การพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า
และศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

THE DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC VEHICLE BATTERY CHERGER

AND APPLICATION OF ELECTRIC VEHICLES IN THE MICROGRID SYSTEM

ภูมิพัฒน์ จำปีทอง
PHOOMPAT JAMPEETHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-D-018-.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC VEHICLE BATTERY CHERGER AND APPLICATION OF ELECTRIC VEHICLES IN THE MICROGRID SYSTEM

PHOOMPAT JAMPEETHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-EN-D-018-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2023
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด
นักศึกษา	นายภูมิพัฒน์ จำปีทอง
รหัสประจำตัว	60601177
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าและศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด โดยได้ทำการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้เร็วกว่าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปและลดอุณหภูมิขณะทำการอัดประจุเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ มีการต่อยอดงานวิจัยด้วยการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ และจำลองการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยผลการศึกษาในแต่ละส่วนเป็นดังนี้ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่ทำการพัฒนาจะใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าช่วง %SOC ของแบตเตอรี่ 20%-80% เท่ากับ 15.8 นาที ส่วนเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO ทั่วไป ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน คือ 50 kW จะใช้เวลาในการอัดประจุ 22 นาที ซึ่งเทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่สามารถลดเวลาในการอัดประจุได้ถึง 6.2 นาที และยังสามารถลดอุณหภูมิขณะอัดประจุได้อีก 0.21 °C สำหรับผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน พบว่า เครื่องอัดประจุที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถอัดประจุให้กับรถยนต์ไฟฟ้าจริงที่นำมาทดสอบถึง 16 รุ่น ได้เป็นอย่างดี และมีโปรโตคอลกลางที่ง่ายต่อการสื่อสารและการบริหารจัดการในอนาคต สำหรับผลการจำลองการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด พบว่า ความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก การเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลด และการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า จะส่งผลกระทบต่อความถี่ไฟฟ้าของระบบไมโครกริด โดยตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่สามารถปรับค่า PI ได้ (Adaptive) ที่ได้ทำการนำเสนอจะสามารถควบคุมการทำงานและรักษาเสถียรภาพของระบบได้เป็นอย่างดี ส่วนตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่และระบบไมโครกริดที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ความถี่ไฟฟ้าของระบบจะแกว่งค่อนข้างสูงและระบบจะสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Development of an Electric Vehicle Battery Charger and Application of Electric Vehicles in The Microgrid System
Student	Mr.Phoompat Jampeethong
Student ID.	60601177
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Prof.Dr.Surin Khomfoi

ABSTRACT

The development of an electric vehicle battery charger and application of electric vehicles in the microgrid system is presented in this thesis. The researcher created an electric vehicle battery charger that uses a frequency pulse charging technique to charge the battery faster than conventional electric vehicle battery chargers while also lowering the temperature during charging to extend the battery's life. There is an extension of research by developing a commercial battery charger for electric vehicles with the Multi-Standard charger and simulating the application of electric vehicles in the microgrid system using the program MATLAB/Simulink. The study results in each section are as follows: the developed frequency pulse electric vehicle battery charger takes 15.8 minutes to charge an electric vehicle battery in the 20%-80% SOC range, while a typical CHAdeMO standard electric vehicle battery charger with the same power rating of 50 kW takes 22 minutes to charge. According to the test results of the Multi-Standard electric vehicle battery charger, the frequency pulse charging technique can reduce charging time by 6.2 minutes and charging temperature by 0.21 °C. Apparently, the developed charger can charge up to 16 different types of electric vehicles that have been tested, and it has a central protocol that is simple to communicate and manage in the future. According to the results of simulating the use of electric vehicles in the microgrid system, the uncertainty of renewable and alternative energy sources, changes in load power, and the use of electric vehicles will all affect the frequency of the microgrid system. The proposed adaptive PI controller can effectively control system operation while maintaining system stability. With uncontrolled microgrid systems and fixed PI controllers, when a change occurs, the system's frequency oscillates quite high, and the system will eventually lose stability.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง การพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าและศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ตลอดการทำงานวิจัย และขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการอาคารระบบไฟฟ้าอัจฉริยะทุกคนที่ให้การช่วยเหลือในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณกองทุนการวิจัย พัฒนา และนวัตกรรม ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ที่สนับสนุนเงินทุนและให้ข้อมูลในการทำวิจัย และขอขอบคุณการสนับสนุนจากทุกฝ่ายที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่งของผู้จัดทำ ซึ่งได้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนผู้จัดทำเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้านเสมอมา ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพรักทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้จัดทำ ผู้จัดทำระลึกในพระคุณและกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ภูมิพัฒน์ จำปีทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ........ I
ABSTRACT........ II
กิตติกรรมประกาศ........ III
สารบัญ........ IV
สารบัญตาราง........ VII
สารบัญรูป........ VIII
บทที่ 1 บทนำ........ 1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา........ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย........ 6
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย........ 6
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน........ 6
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย........ 7
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในงานวิจัย........ 8
1.7 คำศัพท์นิยาม........ 8

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย........ 12
2.1 บทนำ........ 12
2.2 มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า........ 12
2.2.1 มาตรฐาน CHAdeMO........ 12
2.2.2 มาตรฐาน AC Type 2........ 22
2.2.3 มาตรฐาน CCS........ 25
2.3 มาตรฐานการสื่อสาร OCPP........ 28
2.3.1 การสื่อสารด้วยมาตรฐาน OCPP........ 28
2.3.2 ขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นของ OCPP Server........ 31
2.3.3 ข้อมูลของ OCPP Server........ 31
2.3.4 ไดอะแกรมการทำงานของมาตรฐานการสื่อสารแบบ OCPP........ 32
2.4 การควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด........ 37
2.5 บทสรุป........ 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.. 41
3.1 บทนำ.. 41
3.2 เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่.. 41
3.3 ชุดทดสอบเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ.. 44
3.3.1 การจำลองการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.......... 44
3.3.2 เครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ.. 46
3.4 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่... 49
3.4.1 การออกแบบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่......... 49
3.4.2 วงจรกำลังและการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่... 51
3.4.3 การจำลองการทำงานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.. 56
3.4.4 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ................ 57
3.5 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ.......... 61
3.5.1 ผลการทดสอบการสื่อสารมาตรฐาน CHAdeMO ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ.. 61
3.5.2 ผลการทดสอบการอัดประจุของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ... 65
3.5.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่กับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป.. 68
3.6 บทสรุป... 72

บทที่ 4 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน.. 73
4.1 บทนำ.. 73
4.2 การออกแบบสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน...... 73
4.3 การใช้งานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน.................. 80
4.4 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน................ 84
4.5 บทสรุป... 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด.. 95
5.1 บทนำ.. 95
5.2 การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในระบบไมโครกริด... 95
5.3 การสร้างแบบจำลองระบบไมโครกริด.. 96
5.3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ทดสอบ... 96
5.3.2 ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบไมโครกริด... 99
5.3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา.................... 101
5.3.4 ตัวควบคุม PI Controller ที่ใช้ในการศึกษา... 103
5.3.5 อัลกอริธึมการควบคุมแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ...................................... 105
5.4 ผลการจำลองการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด.................................... 107
5.5 บทสรุป.. 112

บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.. 113
6.1 สรุปผลงานวิจัย.. 113
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.. 115

เอกสารอ้างอิง... 116
ภาคผนวก งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.. 121
ประวัติผู้เขียน... 146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2565... 3

2.1 ID number ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่และรถยนต์ไฟฟ้า.. 16

2.2 โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารจากรถยนต์ไฟฟ้าไปยังเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่.................... 16

2.3 โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ไปยังรถยนต์ไฟฟ้า.................... 17

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน AC Type 2.. 24

2.5 ค่า PWM และปริมาณกระแสไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2... 24

2.6 สถานะการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2.............................. 25

2.7 รูปแบบการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุของแต่ละมาตรฐาน................. 27

3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่............................ 45

3.2 การเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายอินพุตหลายเอาท์พุตทั้งแบบ 6 พัลส์ 12 พัลส์ และ 18 พัลส์.. 54

3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่.. 59

3.4 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป.................................... 68

5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม.. 107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. ปี พ.ศ. 2564............. 2
1.2 จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. ปี พ.ศ. 2565............. 2
1.3 รายได้จากการให้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของ กฟภ. ในปี พ.ศ. 2565 3
1.4 ระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่ใช้พลังงานทดแทนและมีการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า............................. 5
2.1 หัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO... 13
2.2 การเชื่อมต่อของหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO........................ 14
2.3 ขั้นตอนการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO.................................... 14
2.4 การสื่อสารด้วยระบบ CAN... 15
2.5 หัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน AC Type 2.. 22
2.6 วงจรควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2.. 23
2.7 หัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS Combo... 25
2.8 Pin Connector CCS Combo... 26
2.9 วงจรควบคุมการทำงานแบบ CCS Combo.. 27
2.10 ระบบการสื่อสารแบบ OCPP ของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.......................... 28
2.11 ระบบสื่อสารของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.. 29
2.12 คำสั่งจากสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าของระบบ OCPP.. 30
2.13 คำสั่งจากระบบควบคุมส่วนกลางของระบบ OCPP.. 30
2.14 Sequence Diagram เริ่มต้นการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า......... 33
2.15 Sequence Diagram เริ่มและหยุดการการอัดประจุแบตเตอรี่โดยใช้ RFID Card........... 34
2.16 Sequence Diagram เริ่มและหยุดการการอัดประจุแบตเตอรี่แบบรีโมท......................... 35
2.17 Sequence Diagram เริ่มต้นการปลดล๊อคหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า................ 36
2.18 ระบบไฟฟ้าที่มีการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนและรถยนต์ไฟฟ้า..................................... 37
3.1 การทำงานของวงจรในแต่ละโหมดของเทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่..................... 42
3.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่.. 44
3.3 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง.. 44
3.4 ผลการจำลองการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ... 45
3.5 สัญญาณขับสวิตช์กำลัง.. 45
3.6 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจร... 46
3.7 ชุดทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ... 47
3.8 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ................ 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.9 โครงสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป.. 49
3.10 วงจรเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่ได้ทำการออกแบบ.. 50
3.11 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่... 51
3.12 โหมดการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่.................... 52
3.13 สถานะการทำงานทั้ง 3 โหมดของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่.. 52
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสกับค่าแรงดันด้านออก (V_D).. 54
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสกับค่ากระแสไฟฟ้าของวงจร.. 55
3.16 วงจรที่ใช้จำลองการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่... 56
3.17 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการทำงานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่.. 56
3.18 กระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่ได้จากการจำลอง.. 57
3.19 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ.. 58
3.20 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ 58
3.21 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ.................. 60
3.22 สัญญาณการการเชื่อมต่อโปรโตคอลระหว่างตัวรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุ.............. 62
3.23 การทำงานของสัญญาณต่าง ๆ ตามมาตรฐาน CHAdeMO.. 63
3.24 การทดสอบฉนวนก่อนการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.. 64
3.25 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่.. 66
3.26 กำลังไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่............ 66
3.27 พลังงานไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่........ 66
3.28 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่.. 67
3.29 กำลังไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่............ 67
3.30 พลังงานไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่........ 68
3.31 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบทั่วไปตามมาตรฐาน CHAdeMO.. 69
3.32 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป.. 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.33 กำลังไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป......... 70

3.34 พลังงานไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป.... 70

3.35 เปรียบเทียบผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่กับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป.................. 72

4.1 การออกแบบโครงสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน........... 74

4.2 รายละเอียดโครงสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน............. 74

4.3 ขนาดเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน...................................... 75

4.4 การพับเหล็กแต่ละส่วนของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.................................... 76

4.5 การพับเหล็กหน้าจอของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.. 76

4.6 การประกอบและขึ้นรูปเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.. 77

4.7 การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า............................. 77

4.8 การประกอบ Power Module ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า...................... 78

4.9 การประกอบวงจรควบคุมของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า................................ 78

4.10 การประกอบวงจรกำลังของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า................................ 79

4.11 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเรียบร้อยพร้อมการใช้งาน........................ 79

4.12 หน้าจอการเลือกมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่... 80

4.13 หน้าจอแจ้งการสแกน RFID CARD.. 81

4.14 จุดสแกน RFID CARD ของเครื่องอัดประจุ.. 82

4.15 หน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ AC Type 2.................... 82

4.16 หน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CHAdeMO.................... 83

4.17 หน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS............................... 83

4.18 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน........................... 85

4.19 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า BMW-i3X.. 85

4.20 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า BMW-iX.. 86

4.21 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Audi-E-Tron.. 86

4.22 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Porhe Taycan.. 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Volvo-XC40	87
4.24 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Mini	88
4.25 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Tesla-Model3	88
4.26 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Tesla-ModelX	89
4.27 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า KIA-Soul	89
4.28 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Hyundai-Kona	90
4.29 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า GWM-ORA	90
4.30 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า MG-ZS	91
4.31 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Nissan-Leaf2019	91
4.32 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Mitsubishi-EV	92
4.33 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า BYD-E6	92
4.34 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า FOMM-FOMMOne	93
5.1 การทำงานของระบบไมโครกริด	96
5.2 ระบบควบคุมของระบบไมโครกริด	97
5.3 บล็อกฟังก์ชันและสัญญาณของระบบควบคุม	100
5.4 ผังการทำงานของระบบการควบคุมที่นำเสนอ	105
5.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบควบคุม	108
5.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดที่ศึกษา	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 เปรียบเทียบค่า PI ของตัวควบคุมแบบปรับตัวได้กับค่า PI ของตัวควบคุมแบบคงที่............	111
5.8 รูปแบบการหน่วงเวลาแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา...	111
5.9 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไมโครกริดจากการหน่วงเวลาในรูปแบบต่าง ๆ........................	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

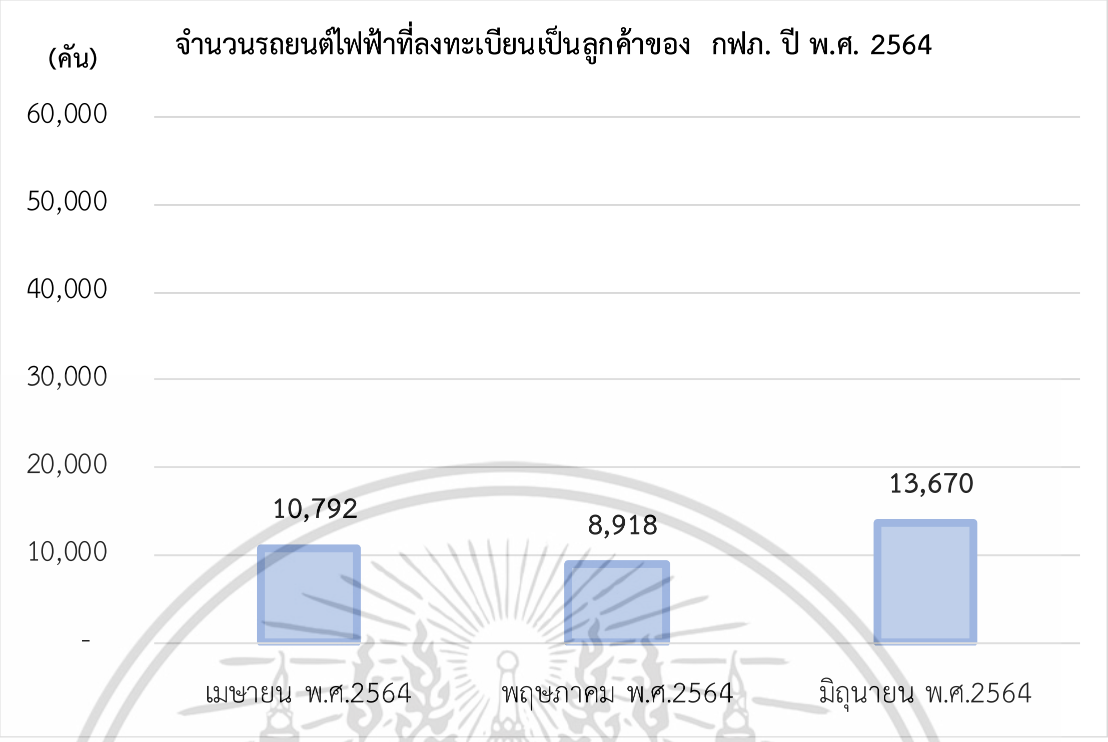
1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา

การขยายตัวของชุมชนเมืองและการเติบโตอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศ ทำให้ปริมาณการใช้รถยนต์พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นทั้งรถยนต์ไฟฟ้า (EV) และรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊ก-อิน ไฮบริดจ์ (PHEV) นอกจากนี้ นโยบายการส่งเสริมและผลักดันเกี่ยวกับการใช้รถยนต์ไฟฟ้าและการเพิ่มจำนวนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของรัฐบาลก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้มีปริมาณการใช้รถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีราคาแพง ลดปัญหาจากฝุ่นพิษ และสร้างอากาศให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น

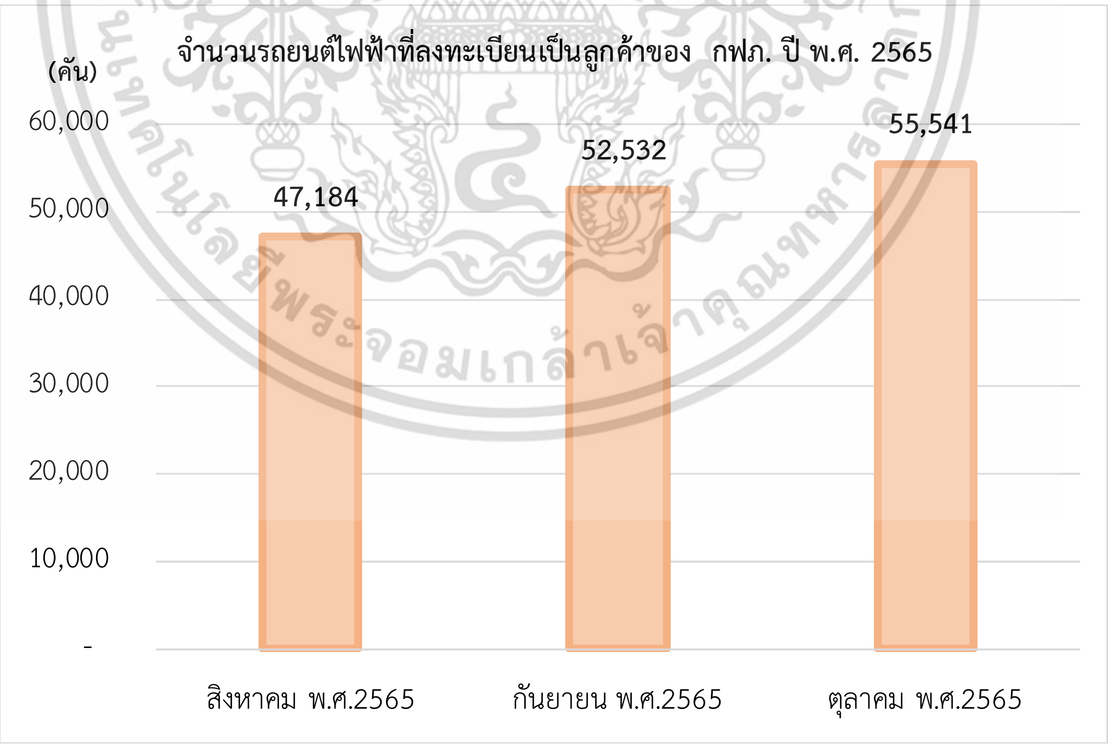
จากการศึกษาข้อมูลจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าของลูกค้าที่ลงทะเบียนใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ในช่วงปี พ.ศ. 2564 เปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2565 พบว่า ปริมาณการใช้รถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยเพิ่มขึ้นถึง 5 เท่า โดยในปี พ.ศ. 2564 มีผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าที่เป็นลูกค้าของ กฟภ. ทั้งหมดประมาณ 1 หมื่นคัน (ข้อมูลเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2564) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่ปี พ.ศ. 2565 มีผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าที่เป็นลูกค้าของ กฟภ. ถึงประมาณ 5 หมื่นคัน (ข้อมูลเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2564) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และเมื่อพิจารณารายได้จากการให้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของ กฟภ. ทั้ง 73 สถานีทั่วประเทศ ในปี พ.ศ. 2565 ตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงเดือนตุลาคมดังแสดงในรูปที่ 1.3 พบว่า กฟภ. มีรายได้จากการให้บริการสถานี่อัดประจุแบตเตอรี่ถึง 9,329,829.80 บาท นั้นหมายความว่าประชาชนกำลังให้ความสนใจและหันมาใช้รถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การเพิ่มสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าและการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ให้สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็วจึงเป็นสิ่งสำคัญในการรองรับการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

เมื่อนำข้อมูลจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. ในเดือนตุลาคมของปี พ.ศ. 2565 จำนวน 55,541 คัน มาวิเคราะห์และจำแนกยี่ห้อของรถยนต์ไฟฟ้า พบว่ารถยนต์ไฟฟ้าที่มาใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. มีมากถึง 20 ยี่ห้อ และยังมีผู้ใช้อีกส่วนหนึ่งที่ไม่ได้ระบุยี่ห้อของรถยนต์ไฟฟ้า จากยี่ห้อและรุ่นของรถยนต์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลให้มาตรฐานในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามีความต่างกันด้วย เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบ Multi-Standard จึงมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับรองรับการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

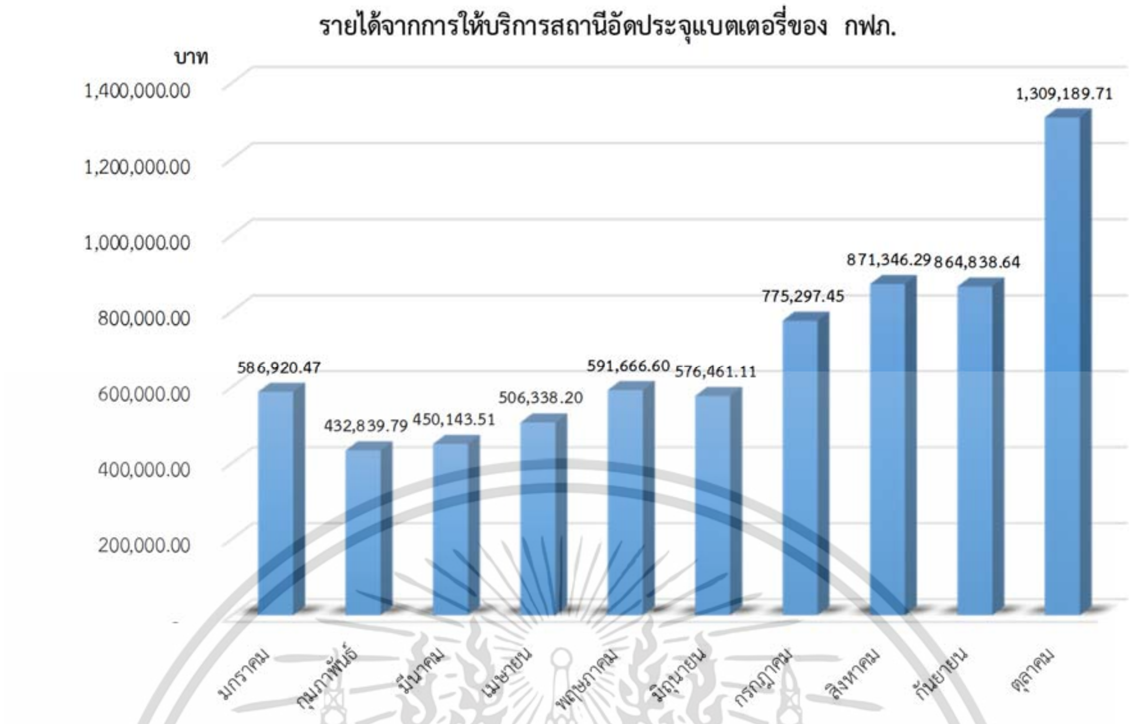


รูปที่ 1.1 จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. ปี พ.ศ. 2564



รูปที่ 1.2 จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. ปี พ.ศ. 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 รายได้จากการให้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของ กฟภ. ในปี พ.ศ. 2565

ตารางที่ 1.1 รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของ กฟภ. ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2565

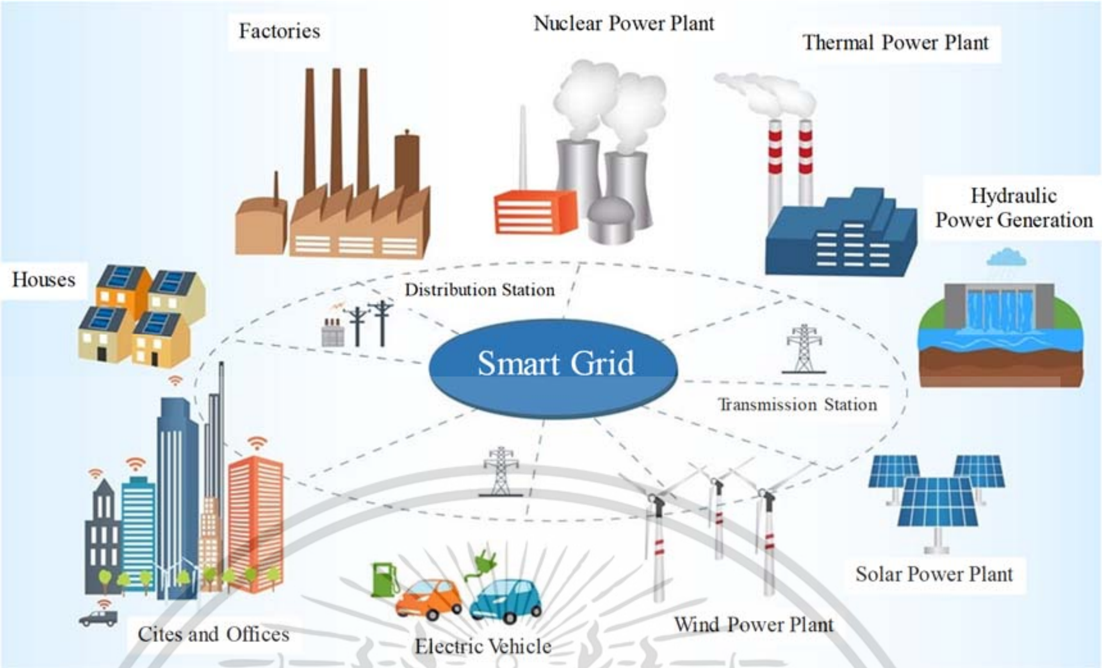
ยี่ห้อรถยนต์ไฟฟ้า	จำนวน (คัน)	ยี่ห้อรถยนต์ไฟฟ้า	จำนวน (คัน)
AUDI	168	MINI	350
BMW	1,427	MITSUBISHI	371
BYD	424	NETA	350
FOMM	120	NISSAN	651
FORD	23	ORA	-
GWM	3,533	PORSCHE	545
HONDA	145	STROM	71
HYUNDAI	155	TESLA	1,140
JAGUAR	47	VOLVO	1,226
KIA	23	other	3,054
MERCEDES-BENZ	202	ไม่ระบุยี่ห้อ	34,126
MG	7,390	**รวม 55,541 คัน**	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป ประกอบด้วยมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า 3 มาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐาน AC Type 2 มาตรฐาน CHAdeMO และมาตรฐาน CCS ถึงแม้ว่า จะมีการกำหนดรูปแบบโปรโตคอลกลางสำหรับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า แต่ผู้ผลิตเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าในท้องตลาดจะไม่เปิดฟังก์ชันการสื่อสารหรือฟังก์ชันการใช้งานต่าง ๆ หากเจ้าของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าต้องการใช้งานจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มในราคาที่สูงต่อผู้ผลิตเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาและการบริหารจัดการ โดยจะถูกผูกขาดจากผู้ผลิตเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเท่านั้น นอกจากนี้ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของผู้ผลิตต่าง ๆ ยังมีการออกแบบโครงสร้าง สถาปัตยกรรมระบบ และการสื่อสารข้อมูลที่ไม่เหมือนกัน ทำให้เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าไม่สามารถสื่อสารข้อมูลกับศูนย์ควบคุมกลางได้ ดังนั้น เพื่อการพัฒนาระบบโครงข่ายการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจึงควรมีรูปแบบการสื่อสารที่อ้างอิงกับโปรโตคอลกลางและมีความยืดหยุ่นในการสื่อสารข้อมูลสูง ง่ายต่อการพัฒนาและเหมาะสำหรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันกำลังถูกพัฒนาให้เป็นระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ (Smart Grid) ที่สามารถควบคุมและบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีเสถียรภาพและมีความน่าเชื่อถือ ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการสื่อสาร เก็บข้อมูล บันทึกผล และแสดงผล นอกจากนี้ ยังมีการเชื่อมต่อแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม เป็นต้น ข้อดีจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก คือ เป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีอยู่ตามธรรมชาติ ไม่มีต้นทุนค่าพลังงานเชื่อเพลิง และช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดสภาวะโลกร้อน [1] แต่ข้อเสียของพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก คือ ความไม่แน่นอนและไม่สม่ำเสมอของแหล่งพลังงาน จึงทำให้การควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเป็นไปด้วยความยากลำบาก โดยเฉพาะระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมาก อาจส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ส่งผลกระทบต่อความถี่ของระบบไฟฟ้า (ความถี่แกว่ง) [2] และหากตัวควบคุมที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอก็อาจทำให้ระบบไฟฟ้าสูญเสียเสถียรภาพและเกิดเหตุการณ์ไฟดับได้ ดังนั้น การควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ดังแสดงในรูปที่ 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 ระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่ใช้พลังงานทดแทนและมีการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า [3]

จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพราะไม่เพียงแต่ความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก แต่ยังมีการเชื่อมต่อกับโหลดอื่น ๆ และการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมากและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานไฟฟ้าอย่างฉับพลัน

จากทั้งหมดที่กล่าวมานี้ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของแนวโน้มปริมาณการใช้รถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น การพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ให้สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันของรถยนต์ไฟฟ้าในแต่ละยี่ห้อ และการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าและศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ทำการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้เร็วกว่าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปและลดอุณหภูมิขณะทำการอัดประจุเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ต่อยอดงานวิจัยสู่เชิงพาณิชย์ด้วยการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard เพื่อลดปัญหาความแตกต่างของมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละยี่ห้อ และทำการศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดด้วยการออกแบบตัวควบคุมแบบ Adaptive ที่สามารถปรับค่า PI ได้ ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะถูกนำเสนอในลำดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

2. เพื่อพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ให้สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับเครื่องอัดประจุที่จำหน่ายในท้องตลาดที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน

3. เพื่อพัฒนาและต่อยอดงานวิจัยสู่เชิงพาณิชย์ด้วยการสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard สำหรับลดปัญหาความแตกต่างของมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละยี่ห้อ

4. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ขนาดกำลังไฟฟ้า 50 kW ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน CHAdeMO ทดสอบการทำงาน และเปรียบเทียบกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปที่ขายในท้องตลาด

2. สร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard ที่ประกอบด้วยมาตรฐาน AC Type 2 มาตรฐาน CHAdeMO และมาตรฐาน CCS และทดสอบการทำงานจริงกับรถยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อต่าง ๆ ที่ใช้งานในปัจจุบัน

3. ศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และเปรียบเทียบผลการทำงานระบบไมโครกริดที่ใช้ตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่ ตัวควบคุมแบบปรับ PI ได้ (Adaptive) และแบบไม่มีตัวควบคุม

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ที่มาของปัญหา และแนวทางการแก้ไขปัญหา ได้แก่การพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ให้สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต ปัญหาเกี่ยวกับมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันของรถยนต์ไฟฟ้าในแต่ละยี่ห้อ และการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

2. ศึกษาหลักการทำงานและมาตรฐานการอัดประจุของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาเทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้เร็วกว่าการอัดประจุแบตเตอรี่แบบทั่วไป

4. ออกแบบและจำลองการทำงานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อศึกษาการทำงานเบื้องต้น

5. สร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบและทดสอบการทำงานจริงกับรถยนต์ไฟฟ้า

6. สร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard เพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์และทดสอบการทำงานจริงกับรถยนต์ไฟฟ้า

7. ศึกษาและวิเคาะห์การประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และเปรียบเทียบผลการทำงานระบบไมโครกริดที่ใช้ตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่ ตัวควบคุมแบบปรับค่า PI ได้ (Adaptive) และแบบไม่มีตัวควบคุม

8. สรุปผลงานวิจัย นำเสนอผลงานในรูปแบบบทความวิชาการและวารสาร และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทราบแนวโน้มและข้อมูลการใช้รถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

2. ทราบหลักการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

3. เกิดองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่รองรับการอัดประจุตามมาตรฐาน CHAdeMO

4. การต่อยอดงานวิจัยสู่เชิงพาณิชย์ด้วยการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard

5. ทราบแนวทางการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดและการพัฒนาฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ เพิ่มเติม เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้าในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเพื่อรองรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ได้แบ่งเนื้อหาส่วนต่าง ๆ ออกเป็น 6 บท ซึ่งภาพรวมเนื้อหาในแต่ละบทสามารถแสดงได้ดังนี้

บทที่ 1 นำเสนอเกี่ยวกับความเป็นมาและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่หลักการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบต่าง ๆ และการทำงานของระบบไมโครกริด

บทที่ 3 นำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบที่อ้างอิงตามมาตรฐาน CHAdeMO ตั้งแต่การพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการจนเป็นงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสุนนการวิจัยจากหน่วยงานภายนอก

บทที่ 4 นำเสนอเกี่ยวกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ที่ได้รับการต่อยอดงานวิจัยจากการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่

บทที่ 5 นำเสนอเกี่ยวกับแนวทางการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริดที่มีการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 6 นำเสนอเกี่ยวกับบทสรุปของงานวิจัย ประกอบด้วย การสรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย

1.7 คำศัพท์นิยาม

แบตเตอรี่	คือ	อุปกรณ์ที่บรรจุพลังงานไฟฟ้าในรูปของพลังงานเคมี แล้วจ่ายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงออกไปใช้งาน
ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ	คือ	ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่นำเทคโนโลยีสื่อสารสารสนเทศมาทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้า สามารถตอบสนองการทำงานได้อย่างชาญฉลาด ใช้ทรัพยากรน้อยลง แต่มีประสิทธิภาพ
มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ AC Type 2	คือ	มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ มีทั้งแบบ 1 เฟส และแบบ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CHAdeMO	คือ	มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง มีต้นแบบการพัฒนามาจากประเทศญี่ปุ่น
มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS	คือ	มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในยุโรปและสหรัฐอเมริกา
เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard	คือ	เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่รวมมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าหลายมาตรฐานไว้ในเครื่องเดียวกัน เช่น มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ AC Type 2 มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CHAdeMO และมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS
การสื่อสารแบบ CAN	คือ	รูปแบบโปรโตคอลการสื่อสารที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานกับรถยนต์ไฟฟ้า โดยการใช้สายสัญญาณสื่อสารเพียง 2 เส้น และได้รับมาตรฐาน ISO11898
การควบคุมการทำงานแบบประสาน	คือ	การควบคุมการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก และการใช้งานโหลดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า
ระบบไฟฟ้าสมัยใหม่	คือ	ระบบไฟฟ้าที่มีการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ มีการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก สามารถตอบสนองต่อโหลดผู้ใช้ไฟและความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีการบูรณาการจัดการพลังงาน เช่น รถยนต์ไฟฟ้าและบ้านอัจฉริยะ มีการให้บริการและการเก็บเงินแบบชาญฉลาด สามารถพึ่งพาตัวเองได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นไปที่ระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Grid)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์	คือ	ตัวแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานกับพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก
Pulse	คือ	รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่
PWM (Pulse Width Modulation)	คือ	สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ มีค่าความถี่คงที่ แต่ความกว้างของพลัสสามารถเปลี่ยนแปลงได้
Actual Amps Value	คือ	กระแสไฟฟ้าใช้งานจริง
Actual Voltage	คือ	แรงดันไฟฟ้าใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vehicle State	คือ	สถานะของรถยนต์ไฟฟ้า
Ready	คือ	สถานะพร้อมใช้งาน
Charging	คือ	กำลังอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า
OCPP (Open Charge Point Protocol)	คือ	ระบบสื่อสารและส่งข้อมูลไปยังซอฟต์แวร์ระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่สถานีอัดประจุกับระบบคลาวด์ เพื่อทำการจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลต่าง ๆ ขณะให้บริการผู้ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า
DFIG	คือ	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง
AC Line Filter	คือ	วงจรกรองความถี่กระแสสลับ
Power Fraction Correction	คือ	ชุดควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าในรถยนต์ไฟฟ้า
Inverter	คือ	วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ
Isolation Transformer	คือ	หม้อแปลงไฟฟ้าแยกกราวด์
Ground fault Interrupter	คือ	ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้ารั่วในรถยนต์ไฟฟ้า
AC Circuit Breaker	คือ	เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสสลับ
Multiples Converter	คือ	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายอินพุตหลายเอาท์พุต
Phase Control	คือ	การควบคุมแบบเฟส
Rectifier	คือ	วงจรเรียงกระแส
SCR	คือ	สวิตช์กำลังไทริสเตอร์
%SOC	คือ	ค่าความจุแบตเตอรี่
Quick Charger	คือ	การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว
DOD (Depth Of Discharge)	คือ	ระดับการปล่อยพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่
V2G	คือ	การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากรถยนต์ไฟฟ้าคืนสู่ระบบไฟฟ้า
Adaptive Control	คือ	ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้
Droop Control	คือ	ตัวควบคุมหลัก
GRC	คือ	ตัวควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
LFC	คือ	ตัวควบคุมความถี่โหลด
PSO (Particle Swarm Optimization)	คือ	อัลกอริธึมการควบคุมแบบกลุ่มอนุภาค
ΔF	คือ	ค่าเบี่ยงเบนความถี่
ΔP_m	คือ	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจากการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า การผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ และการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ΔP_L	คือ	การเปลี่ยนแปลงความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด
H	คือ	ความเฉื่อยของระบบ
D	คือ	ตัวประกอบการหน่วง
N_G	คือ	จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด
$H_{G,i}$	คือ	ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$S_{G,i}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า
S_{MG}	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครกริด
τ	คือ	ค่าหน่วงเวลา
$\bar{\tau}$	คือ	ค่าหน่วงเวลาเฉลี่ย
$\Delta\tilde{\tau}$	คือ	ผลต่างค่าหน่วงเวลา
e	คือ	ค่าฐานของลอการิทึมธรรมชาติ
ω_0	คือ	ค่าความถี่ธรรมชาติ (rad/s)
j	คือ	$\sqrt{-1}$
s	คือ	$j\omega_0$
$c_{\bar{\tau}}$ และ $c_{\tilde{\tau}}$	คือ	ค่าคงที่ปฏิบัติการ
$\bar{U}_{PV}$	คือ	ค่าเฉลี่ยการแผ่รังสีดวงอาทิตย์
$\bar{U}_{WF}$	คือ	ค่าเฉลี่ยความเร็วลม
N_{EV}	คือ	จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดที่เชื่อมต่อในระบบไมโครกริด
L_{EV}	คือ	ตัวเลขเชิงตรรกะ (0 หรือ 1)
$P^{r}_{EV,i}$	คือ	พิกัดกำลังไฟของรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละคัน
$\dot{X}$	คือ	อนุพันธ์ของตัวแปรสถานะในระบบไมโครกริด
$P(s)$	คือ	เมทริกซ์พหุนามของของตัวแปรที่มีการหน่วงเวลา
cl	คือ	สัญญาณควบคุมของระบบแบบวงรอบปิด
$K(s)$	คือ	ตัวควบคุม PI แบบปรับค่าได้
K_P	คือ	ค่าอัตราขยายสัดส่วน
K_I	คือ	ค่าอัตราขยายปริพันธ์
k	คือ	การดำเนินการลำดับที่ k^{th}
$A_{cl,k}$	คือ	เมทริกซ์สถานะวงรอบปิด
$\dot{F}_k$	คือ	อนุพันธ์ของความถี่ของระบบที่การดำเนินการ k ใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยเนื้อหาที่นำเสนอจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย เนื้อหาส่วนที่หนึ่งจะกล่าวถึงหลักการทำงานและรูปแบบการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของแต่ละมาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐาน CHAdeMO มาตรฐาน AC Type 2 และมาตรฐาน CCS เนื้อหาส่วนที่สองจะกล่าวถึงมาตรฐานการสื่อสารแบบ OCPP ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารกลางระหว่างรถยนต์ไฟฟ้า เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และเซิฟเวอร์กลางของระบบควบคุม ส่วนเนื้อหาในส่วนที่สามจะนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีและกลยุทธ์การควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้งานในระบบไมโครกริด เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุม และศึกษาพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการประยุกต์ใช้งานสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.2 มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ปัจจุบัน เทคโนโลยีการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยรูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สาย การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สาย และการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะเทคโนโลยีมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สายที่มีการใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป ได้แก่ มาตรฐาน CHAdeMO มาตรฐาน AC Type 2 และมาตรฐาน CCS ซึ่งทั้ง 3 มาตรฐานนี้ เป็นมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่แบบรวดเร็วที่มีการใช้งานกับรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่าง ๆ ที่จำหน่ายในท้องตลาด และมีการกำหนดโปรโตคอลกลางเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่และศูนย์ควบคุมกลาง ซึ่งรายละเอียดการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของแต่ละมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังนี้ [4], [5]

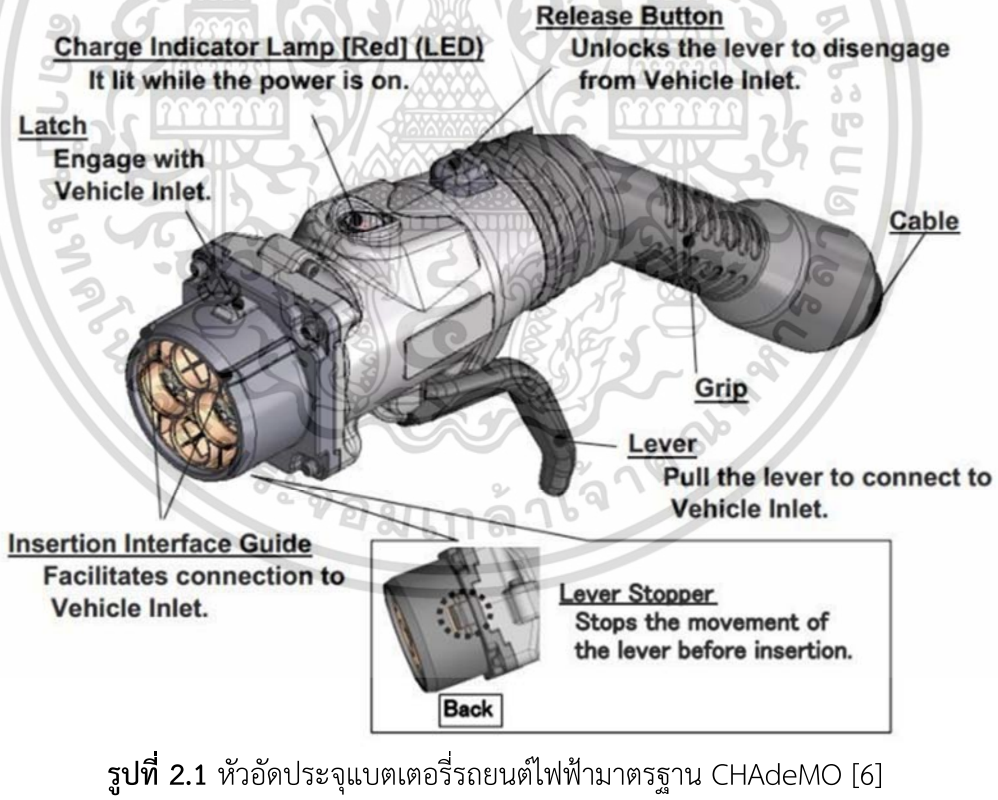
2.2.1 มาตรฐาน CHAdeMO

การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO ถูกออกแบบให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่โดยตรง สามารถอัดประจุได้กับรถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปที่รองรับการอัดประจุแบบมาตรฐาน CHAdeMO ถึงแม้ว่าชนิดและขนาดของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะแตกต่างกันก็ตาม สำหรับหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

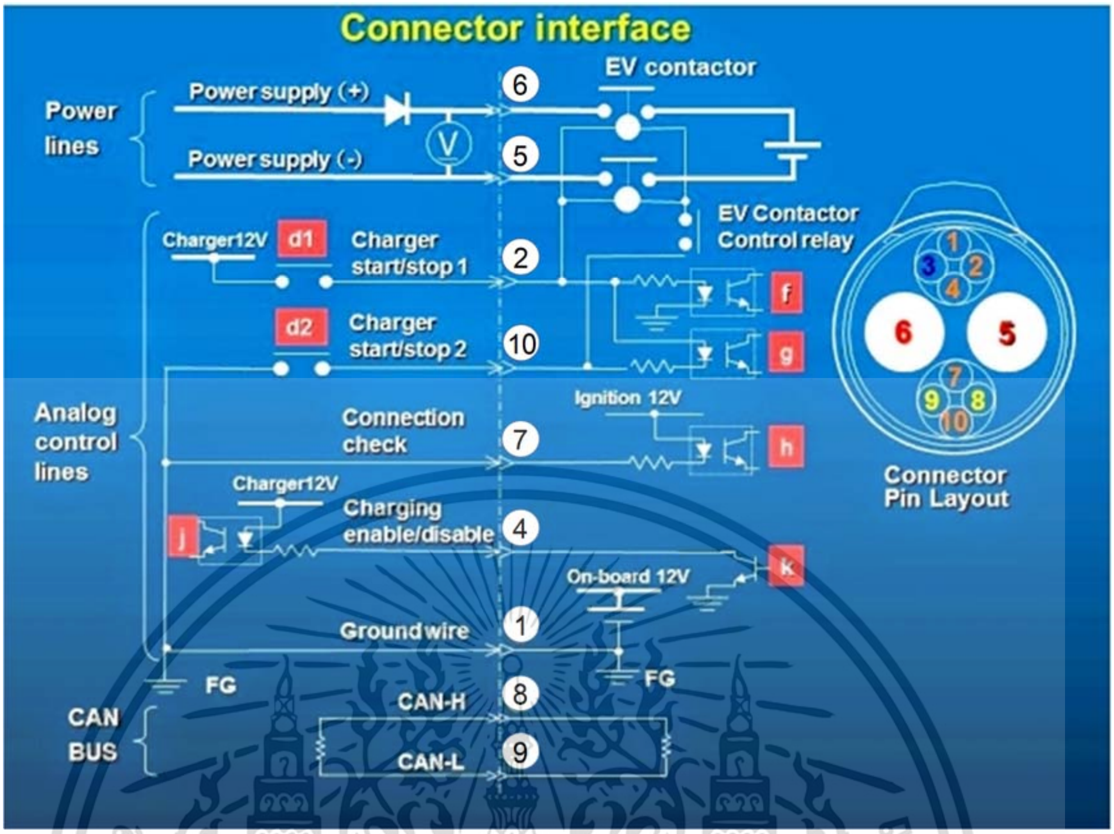
พบว่า ลักษณะของหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO จะค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากสายไฟที่ใช้มีจำนวนมากและได้ออกแบบตำแหน่งของสายไฟให้แยกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 ได้แก่ สีแดงแสดงถึงสายเมนประกอบด้วย pin 5 และ 6 สีส้มแสดงถึงสายสัญญาณควบคุมประกอบด้วย pin 1, 2, 4, 7 และ 10 สีเหลืองแสดงถึงสายข้อมูลประกอบด้วย pin 8 และ 9 ส่วน สีน้ำเงินไม่มีการใช้งาน สำหรับขั้นตอนการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

สำหรับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO นั้น จะใช้ส่งข้อมูลทั้งสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิตอลผ่านทางการสื่อสารแบบ CAN สาเหตุที่ต้องส่งผ่านข้อมูลทั้งวิธีอนาล็อคและดิจิตอล เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอัดประจุเนื่องจากการทำงานที่ผิดปกติของระบบควบคุมแบบดิจิตอล (Digital Control System) ช่วยในการยืนยันลำดับการทำงานของทั้งเครื่องอัดประจุและรถยนต์พลังงานไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และเมื่อสัญญาณอนาล็อคขาดหาย ขั้นตอนการอัดประจุจะทำการปิดตัวเองอย่างทันที (การปิดตัวเองอย่างทันทีจะเร็วกว่าการส่งข้อมูลผ่านทางสัญญาณอนาล็อก)

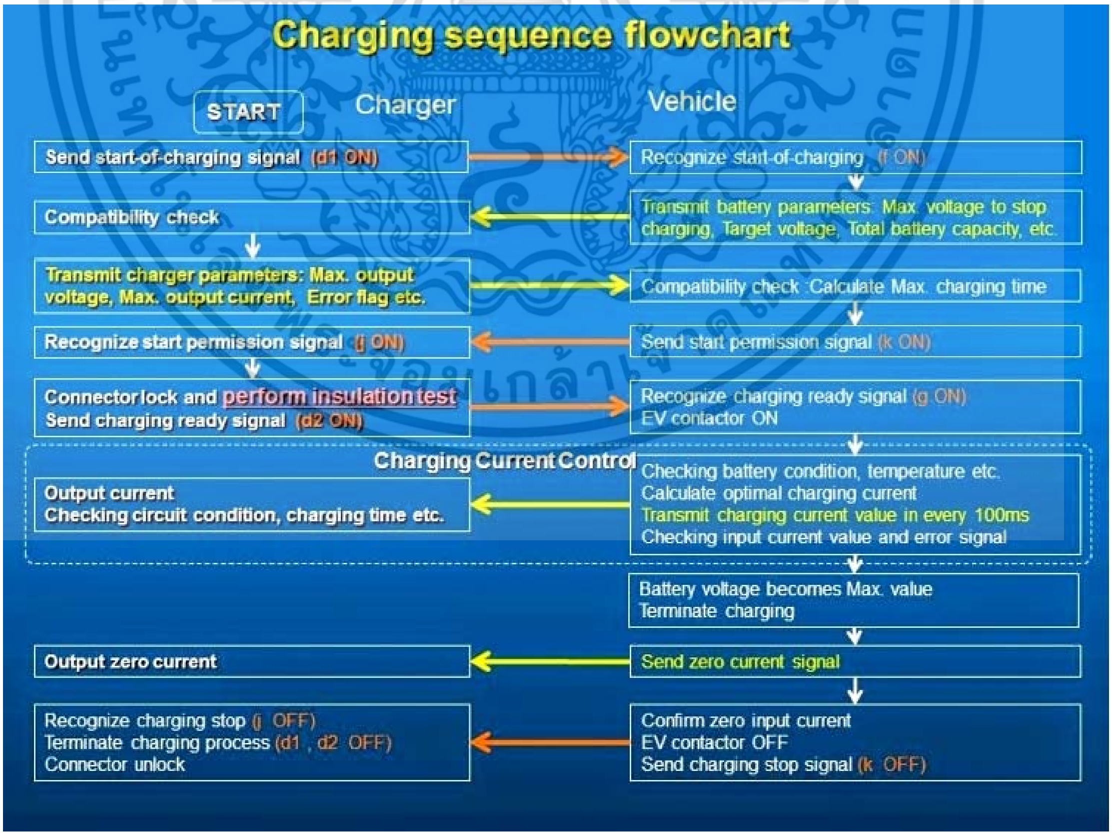


รูปที่ 2.1 หัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



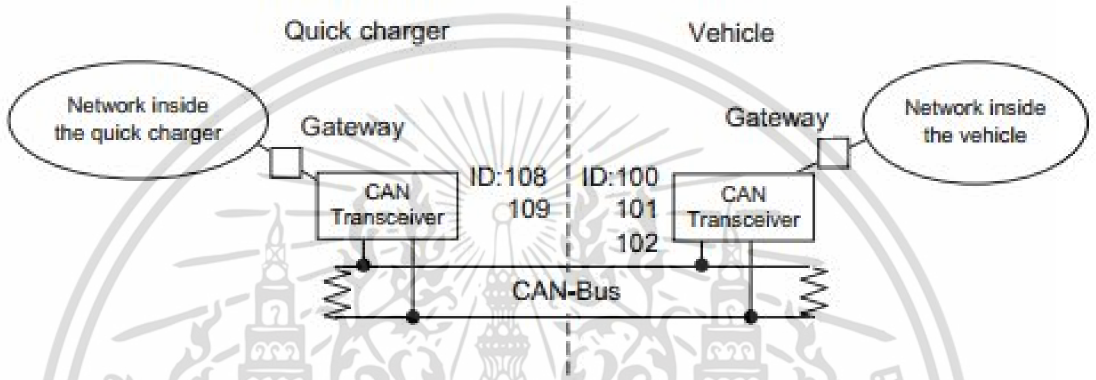
รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อของหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO [6]



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารรูปแบบ CAN ย่อมาจาก Controller Area Network หมายถึง การควบคุมพื้นที่เครือข่าย (การนำคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไปมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้ข้อมูล โปรแกรมหรืออุปกรณ์บางอย่างร่วมกัน) ซึ่ง CAN คือ มาตรฐานการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม ต้องการการส่งข้อมูลเป็นรหัสจังหวะทางไฟฟ้า โดยการใช้สายสัญญาณสื่อสารเพียง 2 เส้น และได้รับมาตรฐาน ISO11898 ซึ่งระบบ CAN Bus (Controller Area Network) เป็นโปรโตคอลการสื่อสารที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานกับรถยนต์ไฟฟ้าเป็นหลัก ในการติดต่อสื่อสารของ CAN จะใช้คู่สัญญาณสอง เส้น คือ CANH และ CANL แสดงดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การสื่อสารด้วยระบบ CAN [6]

ระบบการสื่อสารที่เป็นโปรโตคอลในรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้มาตรฐาน CHAdeMO จะใช้โปรโตคอลแบบ CAN ในการเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ากับรถยนต์ไฟฟ้า โดยจะใช้ ID number ที่มีตัว H นำหน้า ซึ่งย่อมาจาก H’ indicates Hexadecimal ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึงตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ID number ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่และรถยนต์ไฟฟ้า

	ID number
เครื่องอัดประจุ	H'108, H'109
รถยนต์ไฟฟ้า	H'100, H'101, H'102

ตารางที่ 2.2 โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารจากรถยนต์ไฟฟ้าไปยังเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

ส่งจาก	มายัง	ID	ไบต์	เนื้อหา	
รถยนต์	เครื่องอัดประจุ	H'100	0		ไม่ใช้
			1		ไม่ใช้
			2		ไม่ใช้
			3		ไม่ใช้
			4, 5	แรงดันแบตเตอรี่สูงสุด	435 Vdc
			6	พิกัดจากค่าอ้างอิงแบตเตอรี่	138 %
			7		ไม่ใช้
		H'101	0		ไม่ใช้
			1	ตั้งเวลาการอัดประจุ (วินาที)	10 S
			2	ตั้งเวลาการอัดประจุ (วินาที)	Min
			3	เวลาที่ใช้ในการอัดประจุ	Min
			4		ไม่ใช้
			5		ไม่ใช้
			6		ไม่ใช้
			7		ไม่ใช้
		H'102	0	Protocol ควบคุม การสื่อสาร	CHAdeMO
			1,	ค่าแรงดันที่รถต้องการในการอัด	410 Vdc
			3	ค่ากระแสที่รถต้องการในการอัด	รถคำนวณ
			4	สถานะการผิดพลาด	
			5	สถานะของเครื่องอัดประจุ	
			6	เปอร์เซ็นต์ของแบตเตอรี่	
			7		ไม่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ไปยังรถยนต์ไฟฟ้า

ส่งจาก	มายัง	ID	ไบต์	เนื้อหา	เพิ่มเติม
เครื่องอัดประจุ	รถยนต์	H'108	0	ตรวจสอบหัวอัดประจุกับรถยนต์	
			1,2	สเปคของเครื่องอัดประจุ	แรงดัน
			3	สเปคของเครื่องอัดประจุ	กระแส
			4,5	แรงดันที่รถยนต์ต้องการ	จากรถยนต์
			6		ไม่ใช้
			7		ไม่ใช้
		H'109	0	Protocol ควบคุม การสื่อสาร	CHAdeMO
			1,2	แรงดันจริงขาออกจากเครื่องอัด	10 Sec
			3	กระแสจริงขาออกจากเครื่องอัด	60 Min
			4		ไม่ใช้
			5	สถานะและความผิดพลาด	
			6	การตั้งเวลาจากเครื่องอัดประจุ	10 Sec
			7	การตั้งเวลาจากเครื่องอัดประจุ	Min

สำหรับข้อมูลการสื่อสารผ่านโปรโตคอลจากรถยนต์ไฟฟ้าไปยังเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ และข้อมูลการสื่อสารผ่านโปรโตคอลจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ไปยังรถยนต์ไฟฟ้า สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1) ข้อมูลการสื่อสารผ่านโปรโตคอลจากรถยนต์ไฟฟ้าไปยังเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

1. แรงดันแบตเตอรี่สูงสุด [H’100]

ไบต์	5		4	
	0	2	5	8

1 V / บิต, 0 – 600 โวลต์ : 16 บิต

2. พิกัดจากค่าอ้างอิงแบตเตอรี่ [H’101]

ไบต์	6	
	6	4

1 V / บิต, 0 – 600 โวลต์ : 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตั้งเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยผู้ใช้มีการตั้งเวลามาจากภายในรถยนต์

[H'101]

ตั้งเวลาอัดประจุจากรถยนต์โดยมีการกำหนดหน่วยเป็น 10 วินาที ใช้ ไบต์ 1

ไบต์	1	
	F	F

10 วินาที / บิต, 0-2540 วินาที

4. ตั้งเวลาการอัดประจุจากรถยนต์โดยมีการกำหนดหน่วยเป็น 1 นาที ใช้ ไบต์ 2

ไบต์	2	
	F	F

1 นาที / บิต, 0-255 นาที

5. การประมาณเวลาที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ในหน่วยเป็น นาที

[H'101]

ไบต์	3	
	F	F

1 นาที / บิต, 0-254 นาที : 8 บิต

6. Protocol ควบคุม การสื่อสาร [H'102]

ไบต์	0	
	F	F

1 / บิต, Ver. 0-255 : 8 บิต

7. ค่าแรงดันที่รถต้องการในการอัดประจุ [H'102]

ไบต์	2		1	
	0	2	5	8

1 V / บิต, 0 – 600 โวลต์ : 16 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ค่ากระแสที่รถต้องการในการอัดประจุ [H’102]

ไบต์	3	
	F	F

1 A / บิต, Ver. 0-255 A : 8 บิต

9. สถานะการผิดพลาด (Fault flag) [H’102]

ไบต์	4							
	1				F			

(4) (3) (2) (1) (0)

(0) แรงดันแบตเตอรี่เกิน (0: ปกติ, 1: บกพร่อง)

(1) แรงดันแบตเตอรี่ต่ำ (0: ปกติ, 1: บกพร่อง)

(2) กระแสของแบตเตอรี่เกิดข้อบกพร่อง (0: ปกติ, 1: บกพร่อง)

(3) อุณหภูมิแบตเตอรี่สูง (0: ปกติ, 1: บกพร่อง)

(4) แรงดันของแบตเตอรี่เกิดข้อบกพร่อง (0: ปกติ, 1: บกพร่อง)

10. สถานะของรถยนต์ (Status flag) [H’102]

ไบต์	5							
	1				F			

(4) (3) (2) (1) (0)

(0) รถยนต์ถูกต่อสายอัดประจุ (0: ไม่ใช้, 1: ใช้)

(1) รถยนต์จอดไม่ตรงตำแหน่ง (0: ตรงตำแหน่ง, 1: ไม่ตรงตำแหน่ง)

(2) ระบบการอัดประจุมีปัญหา (0: ปกติ, 1: บกพร่อง)

(3) สถานะของรถยนต์ (0: แมกเนติกคอนเทคเตอร์ของหัวอัดประจุถูกต่อ, 1: แมกเนติกคอนเทคเตอร์ของหัวอัดประจุไม่ถูกต่อ)

(4) สถานะคำสั่งการอัดประจุและหยุดอัดประจุ (0: มีการอัดประจุ, 1: หยุดอัดประจุ)

11. เปอร์เซ็นต์ของแบตเตอรี่ที่นำออกไปแสดงบนหน้าจอเครื่องอัดประจุ

ไบต์	6	
	6	4

1 % / บิต, 0-100 % : 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ข้อมูลการสื่อสารผ่านโปรโตคอลจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ไปยังรถยนต์ไฟฟ้า

1. ตรวจสอบหัวอัดประจุกับรถยนต์ [H’108]

ไบต์	0	
	F	F

1 บิต, 0 – 255 : 8 บิต

0 เครื่องอัดประจุหรือหัวอัดประจุไม่สามารถเข้ากับรถยนต์ไฟฟ้า

2. แรงดันสูงสุดของเครื่องอัดประจุที่สามารถใช้งานได้ [H’108]

ไบต์	2		1	
	0	2	5	8

1 V / บิต, 0 – 600 โวลต์ : 16 บิต

3. กระแสสูงสุดของเครื่องอัดประจุที่สามารถใช้งานได้ [H’108]

ไบต์	3	
	F	F

1 A / บิต, 0 – 600 โวลต์ : 16 บิต

4. แรงดันที่รถยนต์ต้องการโดยตัวรถยนต์จะส่งออกมา [H’108]

ไบต์	5		4	
	0	2	5	8

1 V / บิต, 0 – 600 โวลต์ : 16 บิต

5. Protocol ควบคุม การสื่อสาร [H’109]

ไบต์	0	
	F	F

1 / บิต, 0 – 255 : 8 บิต

6. แรงดันขาออกขณะมีการอัดประจุ [H’109]

ไบต์	2		1	
	0	2	5	8

1 V / บิต, 0 – 600 โวลต์ : 16 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กระแสขาออกขณะมีการอัดประจุ [H’109]

ไบต์	3	
	F	F

2 A / บิต , 0 – 255 A : 8 บิต

8. สถานะการผิดพลาด (Fault flag) [H’109]

ไบต์	5							
	3				F			

(5) (4) (3) (2) (1) (0)

(0) สถานะของเครื่องอัดประจุ (0: เตรียมอัดประจุ, 1: อัดประจุ)

(1) สถานะของเครื่องอัดประจุไม่สามารถทำงานได้ (0: ปกติ, 1: บกพร่อง)

(2) หัวอัดประจุล๊อคเรียบร้อย (0: เปิด , 1: ล๊อค)

(3) สถานะตรวจสอบแบตเตอรี่ (0: ใช้ได้, 1: ใช้ไม่ได้)

(4) ระบบการอัดประจุไม่สามารถทำงานได้ (0: ไม่ใช้, 1: ใช้)

(5) เครื่องอัดประจุหยุดการทำงาน (0: เครื่องทำงาน, 1: เครื่องหยุดทำงาน)

9. ตั้งเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยผู้ใช้มีการตั้งเวลาหน้าเครื่องอัดประจุ [H’109]

- ตั้งเวลาอัดประจุโดยมีการกำหนดหน่วยเป็น 10 วินาที ใช้ ไบต์ 6

ไบต์	6	
	F	F

10 วินาที / บิต, 0-2540 วินาที

- ตั้งเวลาอัดประจุโดยมีการกำหนดหน่วยเป็น 1 นาที ใช้ ไบต์ 7

ไบต์	7	
	F	F

1 นาที / บิต, 0-255 นาที

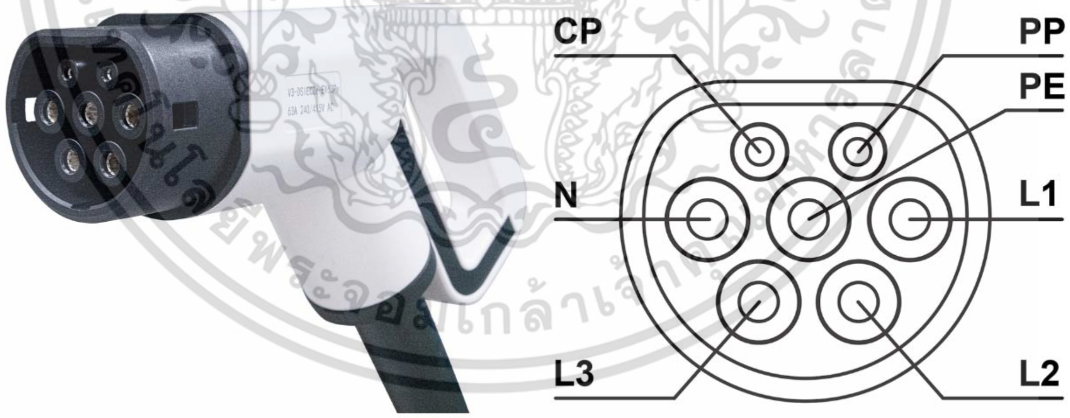
จากข้อมูลดังกล่าว ทำให้ทราบถึงหลักการทำงาน การสื่อสาร และการรับส่งข้อมูลของการอัดประจุตามมาตรฐาน CHAdeMO ซึ่งทาง Local Server จะสามารถทราบถึงข้อมูลการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าและเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ทุกเครื่องที่มีการติดต่อสื่อสารใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 มาตรฐาน AC Type 2

มาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ AC Type 2 (Type 2 Standard) เป็นการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 240 โวลต์ หรือระบบไฟฟ้า 3 เฟส แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 400 โวลต์ สำหรับการอัดประจุที่ระดับ 2 นี้ จะต้องติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่หรือตัวควบคุมการอัดประจุด้วย การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 240 โวลต์นั้นมีใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เช่น เยอรมัน อิตาลี และกลุ่มประเทศในแถบยุโรป การติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้มักจะติดตั้งตามที่พักอาศัย เนื่องจาก มีการติดตั้งที่ง่ายและช่วยเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าว่าการอัดประจุแบตเตอรี่จะเพียงพอต่อการใช้งานในแต่ละวัน สำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ระดับ Level 2 นี้ จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้ามากกว่าการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Level 1

หัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน AC Type 2 แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 มีหน้าคอนแทคอยู่ 7 ช่อง สามารถใช้งานได้กับระบบไฟฟ้าสามเฟส 400 V หัวอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2 สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงถึง 43 kW โดยใช้สายเคเบิลแบบคงที่ (63 A/400 V) และขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 22 kW ด้วยสายเคเบิลแบบถอดได้ (32 A/400 V)



รูปที่ 2.5 หัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน AC Type 2
ที่มา: https://www.nectec.or.th/news/news-public-document/evcharger-standard.html

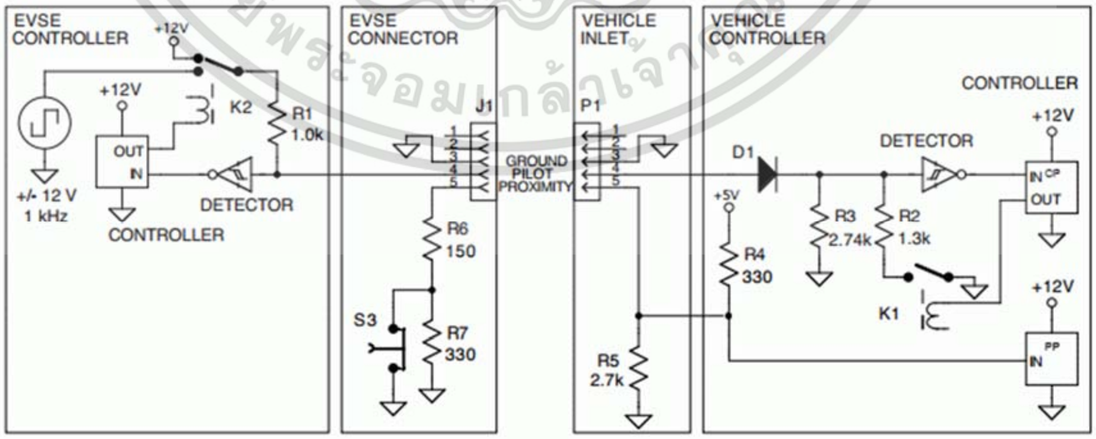
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน AC Type 2 ประกอบด้วยช่องเชื่อมต่อทั้งหมด 7 ช่อง สำหรับช่องขนาดเล็กจำนวน 2 ช่อง เป็นช่องการสื่อสารสัญญาณควบคุมต่าง ๆ ส่วนช่องขนาดใหญ่เป็นวงจรกำลังมีทั้งหมด 5 ช่อง โดยช่องตรงกลางจะใช้สำหรับการต่อสายดิน โดย Pin ทั้งหมดของหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน AC Type 2 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- Proximity pilot (PP): สัญญาณก่อนการเริ่มทำงาน
- Control pilot (CP): การส่งสัญญาณหลังเริ่มทำงาน
- Protective earth (PE): ระบบป้องกันไฟฟ้าลัดวงจรขนาดเต็ม 6 มิลลิเมตร (0.24 นิ้ว)
- Neutral (N)
- L1 แหล่งจ่าย เฟสที่หนึ่ง
- L2 แหล่งจ่าย เฟสที่สอง
- L3 แหล่งจ่าย เฟสที่สาม

ระบบการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่เป็นโปรโตคอลของมาตรฐาน AC Type 2 จะใช้วิธีการวัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดขา 4 (CP) และขา 5 (PP) มาวิเคราะห์เพื่อแปรเป็นคำสั่งการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

คณะกรรมการ EVSE ได้กำหนดค่าเริ่มต้นการอัดประจุด้วยการใช้ค่าตัวต้านทาน (Resistor) เป็นตัวกำหนดขนาดของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน AC Type 2 และวงจรอัดประจุแบบ On Broad Charge ภายในตัวรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งขนาดของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่พิกัดกระแสไฟฟ้า 32 A จะอ่านค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในได้เท่ากับ 220 Ω ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งวงจรควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นวงจรควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2 จะเห็นว่า Pin ที่ 5 Proximity pilot (PP) หรือสัญญาณก่อนเริ่มการทำงานจะเป็นการเช็คขนาดสายไฟ โดยอ่านค่าจากแรงดันไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานไฟฟ้าแต่ละค่า ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแตกต่างกันไปตามรุ่นของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน AC Type 2

Resistance PP-PE (Max Cable Throughput)		
Resistance (Ω)	Current (A)	Wire Cross Section (mm^2)
> 1500 *	6	-
1500	13	1.5
680	20	2.5
220	32	6
100	63	16
< 100 **	80	-

* No resistor connected, ** Recommended ~50 Ω

หลังจากเสียบหัวอัดประจุแบตเตอรี่เข้ากับรถยนต์ไฟฟ้า ตัวควบคุมการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่จะทำการส่งแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 V เพื่อแจ้งให้รถยนต์ทราบว่าได้ต่อระบบเรียบร้อยแล้วผ่าน Pin ขาที่ 4 ของระบบสื่อสาร และเมื่อรถยนต์ Enable เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่จะส่ง Pulse ที่เป็น PWM เพื่อสื่อสารบอกปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5 โดยสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานได้จากระบบ Local Server มาตรฐาน AC Type 2 ที่ถูกติดตั้งตามสถานีต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ค่า PWM และปริมาณกระแสไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2

PWM (%)	SAE Continuous (A)	SAE Short Term (Apeak)
50	30	36
40	24	30
30	18	22
25	15	20
16	9.6	
10	6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 สถานะการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่มาตรฐาน AC Type 2

Base Status	Charging Status	Resistance (CP-PE) (Ω)	Resistance (R2) (Ω)	Voltage (CP-PE) (V)
A	Standby	Open		+12
B	Vehicle Detected	2,740		+9±1
C	Ready (Charging)	882	1,300 Ω	+6±1
D	With Ventilation	246	270 Ω	+3±1
E	No Power (Shut Off)			0
F	Error			-12

2.2.3 มาตรฐาน CCS

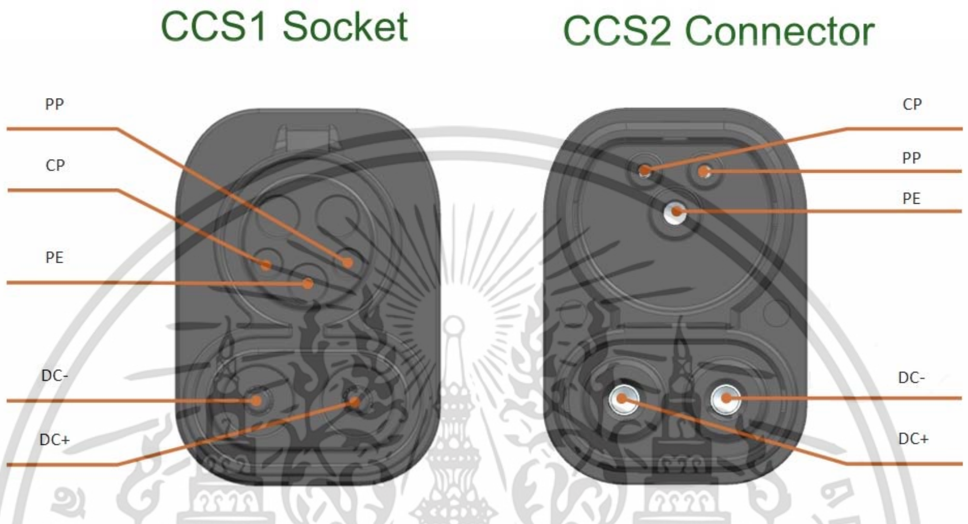
ค่ายรถยนต์ไฟฟ้ายุโรปและสหรัฐอเมริกาได้พัฒนามาตรฐาน SAE J1772 ซึ่งเป็นระบบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบรวดเร็ว เป็นมาตรฐานที่ทำความร่วมมือกันระหว่างบริษัทรถยนต์ไฟฟ้าค่ายยุโรปและสหรัฐอเมริกา เช่น Audi, BMW, Daimler, Ford, General Motors, Porsche และ Volkswagen มาตรฐาน SAE มีการกำหนดลักษณะของหัวอัดประจุแตกต่างกับมาตรฐาน CHAdeMO โดยกำหนดตามลักษณะของระบบไฟฟ้า คือ ไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS Combo สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 หัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS Combo [6]

ที่มา: http://www.evthai.com/article/เครื่องชาร์จรถไฟฟ้า/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการสื่อสารของมาตรฐาน CCS จะคล้ายกับมาตรฐาน AC Type 2 มีความแตกต่างกันไม่มากนักซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.8 ระบบการสื่อสารที่เป็นโปรโตคอลในรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้มาตรฐาน CCS จะใช้โปรโตคอลในการเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่กับรถยนต์ไฟฟ้า โดยจะใช้การวัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดขา 4 (CP) ขา 5 (PP) เช่นเดียวกับมาตรฐาน AC Type 2 และนำมาวิเคราะห์เพื่อแปรเป็นคำสั่งระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่กับรถยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 Pin Connector CCS Combo

ที่มา: https://www.fiverevse.com/product/150A-US-Korea-Taiwan-to-European-CCS-Combo-1-to-CCS-Combo-2-EV-Quick-Charger-Adapter.html

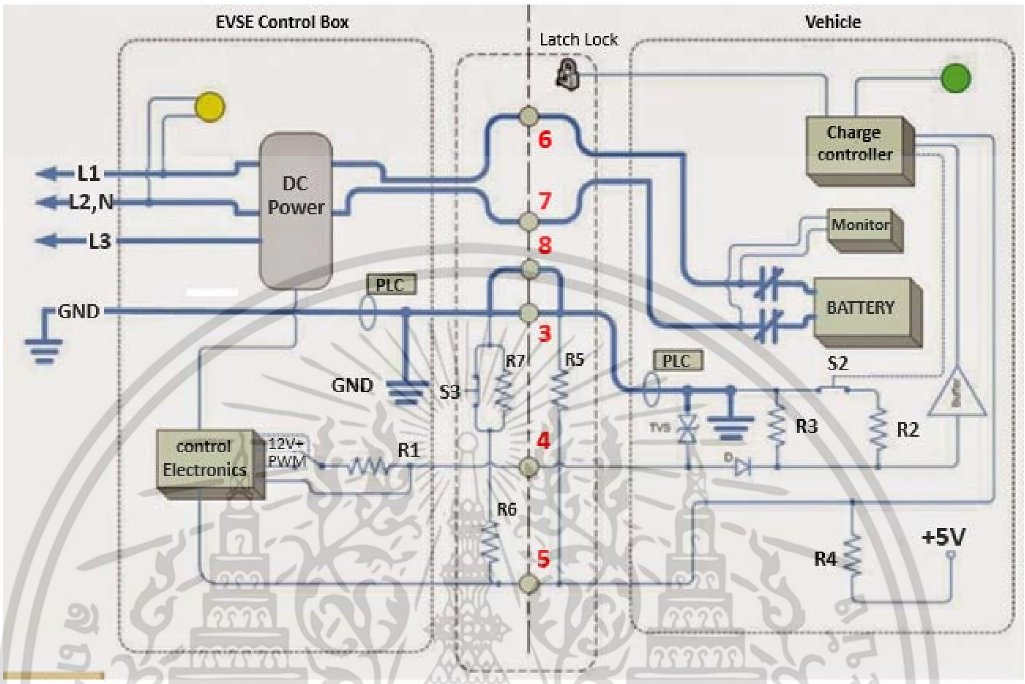
ก่อนหน้านี้ได้มีการกล่าวถึงระบบการทำงานของมาตรฐาน AC Type 2 ที่จะมีการเช็คขนาดสายของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าก่อนการเริ่มต้นทำงาน การทำงานของมาตรฐาน CCS ก็เช่นเดียวกัน จะมีการส่งสัญญาณมาจากตัวควบคุมของเครื่องอัดประจุเพื่อเช็คขนาดสายไฟที่ใช้งานจริงและเพิ่มเติมคือเช็คพิกัดกำลังของเครื่องอัดประจุฝั่งทางด้านกระแสตรงผ่านหัวอัดประจุที่ขา 5 (PP) ซึ่งวงจรควบคุมการทำงานแบบ CCS Combo สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

หลังจากเสียบหัวอัดประจุกับรถยนต์ไฟฟ้าแล้วจะเริ่มการทำงานโดยวงจรควบคุมของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่จะทำการส่งแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 V เพื่อแจ้งให้รถยนต์ไฟฟ้าทราบว่าได้ต่อระบบเรียบร้อยแล้วผ่าน Pin ขาที่ 4 ของระบบสื่อสาร และเมื่อรถยนต์ไฟฟ้า Enable เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่จะส่ง Pulse ที่เป็น PWM เพื่อสื่อสารบอกจำนวนกระแสไฟฟ้าที่รถยนต์ไฟฟ้าต้องการตลอดเวลา ซึ่งค่าที่สามารถตรวจจับได้จากระบบการอัดประจุแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน CCS เป็นดังนี้

- Actual Amps Value
- Actual Voltage
- Vehicle State: 1 = Ready, 2 = EV is present, 3 = Charging, 4 = Charging with ventilation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบสถานะความผิดปกติภายในรถยนต์ไฟฟ้าได้โดยการตรวจจับสภาวะการเปลี่ยนแปลงของสวิตซ์ S2 ภายในตัวรถยนต์ไฟฟ้าที่เมื่อเกิดความผิดปกติจะส่งสัญญาณมาให้กับเครื่องอัดประจุผ่านคอนเน็กเตอร์ Pin ขาที่ 4 (CP)



รูปที่ 2.9 วงจรควบคุมการทำงานแบบ CCS Combo

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

จากการศึกษาการทำงานของมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั้ง 3 มาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐาน CHAdeMO มาตรฐาน AC Type 2 และมาตรฐาน CCS สามารถสรุปรูปแบบการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าและเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ได้ดังตารางที่ 2.7 ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณและส่งไปยังเซิฟเวอร์กลางเพื่อจัดเก็บข้อมูลและนำมาวิเคราะห์สำหรับใช้ในการบริหารจัดการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ต่อไป

ตารางที่ 2.7 รูปแบบการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุของแต่ละมาตรฐาน

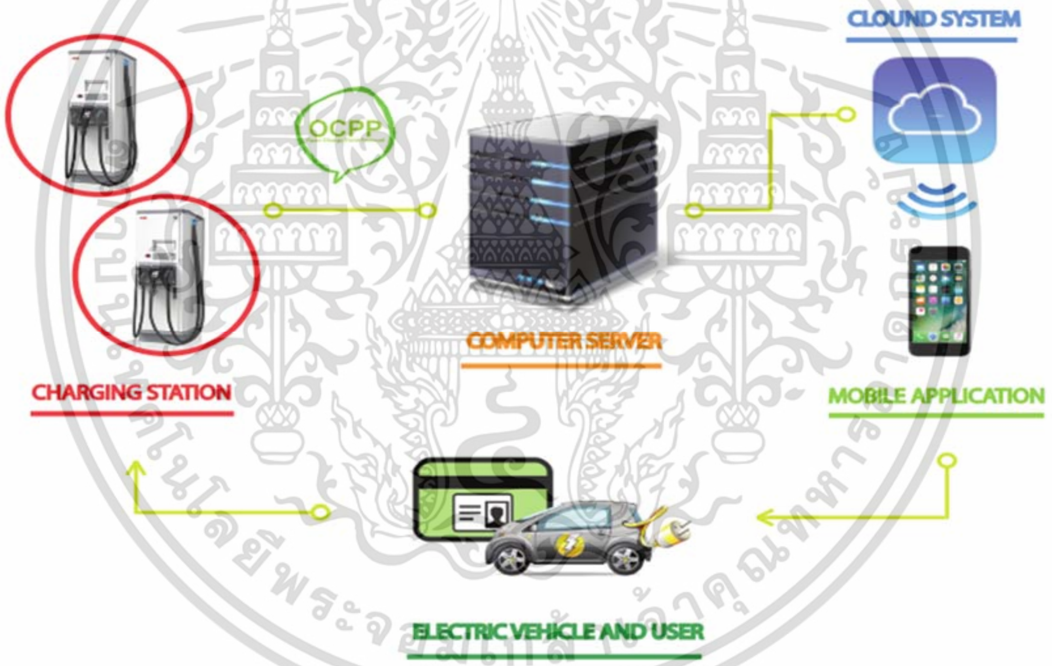
ชนิดหัวอัดประจุ	ลักษณะการสื่อสารกับหัวชาร์จแต่ละประเภท
CHAdeMO	CAN BUS Protocol (Connector Pin CAN H , CAH L)
CCS / Combo	PLC Protocol (Connector Pin CC , CP)
AC Type 2	PLC Protocol (Connector Pin CC , CP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มาตรฐานการสื่อสาร OCPP

OCPP (Open Charge Point Protocol) เป็นระบบสื่อสารและส่งข้อมูลไปยังซอฟต์แวร์ระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่สถานีอัดประจุกับระบบคลาวด์ (Could) เพื่อทำการจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลต่าง ๆ ขณะให้บริการผู้ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะซอฟต์แวร์การจัดการค่าใช้จ่าย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ รวมถึงการควบคุมการเข้าถึงการเรียกเก็บเงิน การประมวลผลการชำระเงิน และข้อมูลการใช้งานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

สถานีอัดประจุไฟฟ้าสามารถสื่อสารข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตกับซอฟต์แวร์การจัดการเพื่อจุดประสงค์ในการปฏิบัติการและควบคุมการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าผ่านระบบการสื่อสารแบบ OCPP ซึ่งเป็นโปรโตคอลแบบเปิดสำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ากับเครือข่ายสถานีอัดประจุแบตเตอรี่หรือศูนย์การควบคุมการทำงานกลางขององค์กรอื่น ๆ ซึ่งตัวอย่างระบบการสื่อสารแบบ OCPP ของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบการสื่อสารแบบ OCPP ของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

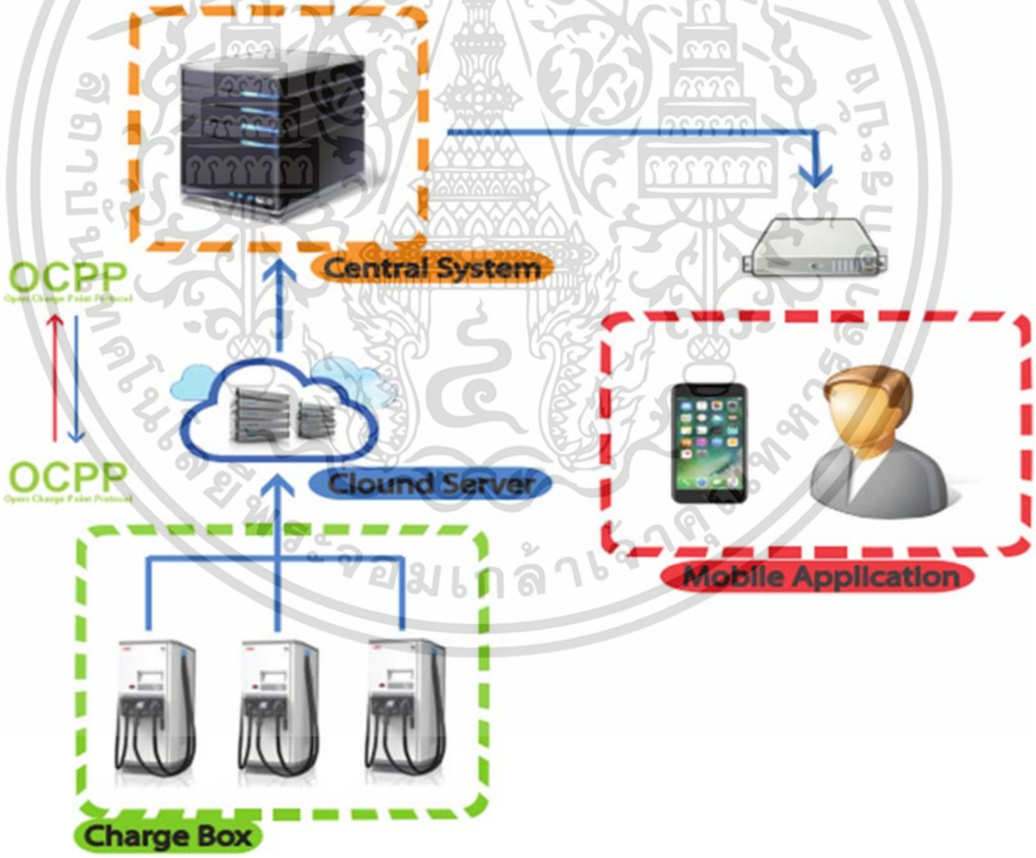
2.3.1 การสื่อสารด้วยมาตรฐาน OCPP

การสื่อสารแบบมาตรฐาน Open Charge Point Protocol (OCPP) เป็นมาตรฐานแบบเปิดที่ถูกจัดตั้งโดย E-laad ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวิธีการสื่อสารของรถยนต์ไฟฟ้ากับระบบส่วนกลาง ใช้เทคโนโลยีโปรโตคอล Simple Object Access Protocol (SOAP) ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงข่ายที่สามารถส่งข้อมูลผ่านระบบอินเตอร์เน็ตได้อย่างสะดวกรวดเร็ว SOAP จะสื่อสารด้วยภาษาที่เรียกว่า Extensible Markup Language (XML) ซึ่งเป็นภาษาที่ถูกออกแบบมาเพื่อการเก็บข้อมูล อีกทั้งยังสามารถใช้ร่วมกับภาษา HTML ที่เป็นที่รู้จักบนระบบอินเตอร์เน็ตอีกด้วย

รูปที่ 2.11 เป็นการอธิบายการสื่อสารของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยมาตรฐานการสื่อสาร OCPP โดยระบบการสื่อสารและการรับส่งข้อมูลในสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะถูกออกแบบให้ตรงกับมาตรฐานการอัดประจุของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (Charge Box) ข้อมูลจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังระบบประมวลผลแบบคลาวด์ที่สามารถส่งผ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จากนั้นระบบคลาวด์จะส่งข้อมูลต่อไปยังคอมพิวเตอร์เซิฟเวอร์ซึ่งใช้เป็นระบบควบคุมส่วนกลาง (Central System) ที่มีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า หลังจากนั้นจะมีการคัดกรองข้อมูลที่จำเป็นต่อผู้ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าและส่งข้อมูลนี้ไปยังเซิฟเวอร์ขนาดที่เล็กกว่าเพื่อนำไปใช้แสดงผลบนโทรศัพท์มือถือผ่านระบบแอปพลิเคชัน (Mobile Application) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจข้อมูลได้ง่ายและใช้ได้อย่างสะดวก

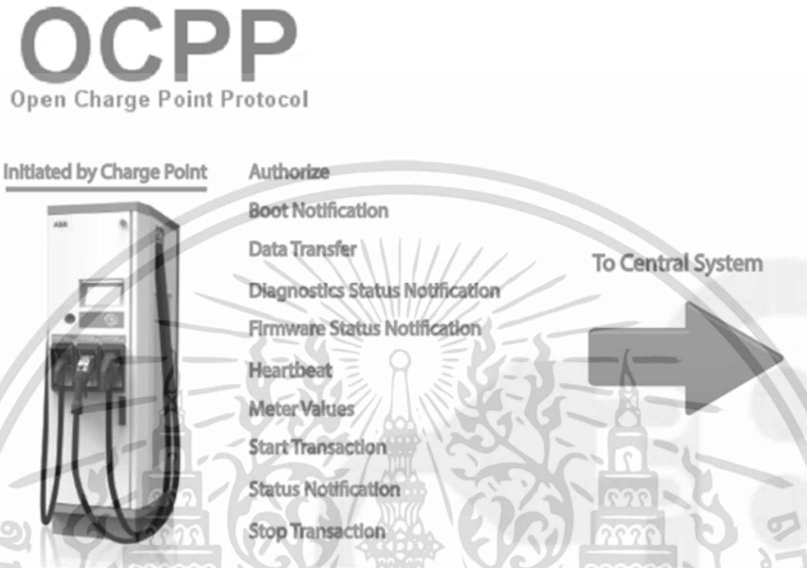


รูปที่ 2.11 ระบบสื่อสารของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเริ่มต้นการสื่อสารของ OCPP ระหว่างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ากับระบบควบคุมส่วนกลาง การสื่อสารมักจะเริ่มต้นด้วยการสั่งขอใช้งานและตอบรับการใช้งาน โดยรูปแบบคำสั่งของ OCPP จะใช้ชื่อชุดคำสั่งตามด้วย .req() ส่วนคำสั่งตอบรับจะเป็นชื่อชุดคำสั่งและตามด้วย .conf() ซึ่งคำสั่งจากสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของระบบ OCPP สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และคำสั่งจากระบบควบคุมส่วนกลางของระบบ OCPP สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 คำสั่งจากสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าของระบบ OCPP

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

รูปที่ 2.13 คำสั่งจากระบบควบคุมส่วนกลางของระบบ OCPP

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นของ OCPP Server

หลักการและขั้นตอนเบื้องต้นที่ผู้ใช้สามารถนำไปใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องมีดังนี้

- เมื่อผู้ขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าต้องการใช้งานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถเริ่มการใช้งานด้วยการนำคีย์การ์ดไปทาบกับตู้เพื่อขอใช้สิทธิ (Authorize) และระบุเลขยืนยันตัวตนในการใช้งาน

- เมื่อผู้ใช้เลือกหัวอัดประจุที่ต้องการ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะส่งข้อมูลไปยัง OCPP Server เพื่อเริ่มการใช้งาน (Start Transaction) โดยจะระบุหมายเลขหัวอัดประจุและหมายเลขมิเตอร์ก่อนการใช้งานส่งมาที่ Server

- ในขณะที่หัวอัดประจุจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับรถยนต์ไฟฟ้าอยู่นั้น เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะส่งข้อมูลขอมิเตอร์ (Meter Value) ขณะจ่ายไฟเป็นระยะ ๆ ไปยัง OCPP Server

- เมื่ออัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเต็มและผู้ใช้งานถอดหัวอัดประจุออกจากตัวรถยนต์ไฟฟ้าเก็บไว้ที่ตู้เรียบร้อยแล้ว เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะส่งข้อมูลจบการใช้งาน (Stop Transaction) ไปยัง OCPP Server โดยจะส่งหมายเลขมิเตอร์สุดท้ายเพื่อสรุปจำนวนไฟที่ใช้ไปในการใช้งานครั้งนี้

2.3.3 ข้อมูลของ OCPP Server

ข้อมูลต่าง ๆ ที่ระบบ OCPP ใช้งาน และส่งข้อมูลไปยังเซิฟเวอร์มีดังนี้

2.3.3.1 Start Transaction

- Charge id คือ หมายเลขตู้ไฟ
- Connector id คือ หมายเลขหัวจ่าย
- id Tag คือ หมายเลขบัตรเติมพลังงานไฟฟ้า
- Meter start คือ ค่าเลขมิเตอร์ก่อนเริ่มเติมไฟ
- Timestamp คือ เวลาที่เริ่มใช้

2.3.3.2 Meter Value

- Charge id คือ หมายเลขตู้ไฟ
- Connector id คือ หมายเลขหัวจ่าย
- Transaction id คือ หมายเลขการใช้งาน
- Value คือ หมายเลข meter
- Unit คือ หน่วยของมิเตอร์ (watt hour)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

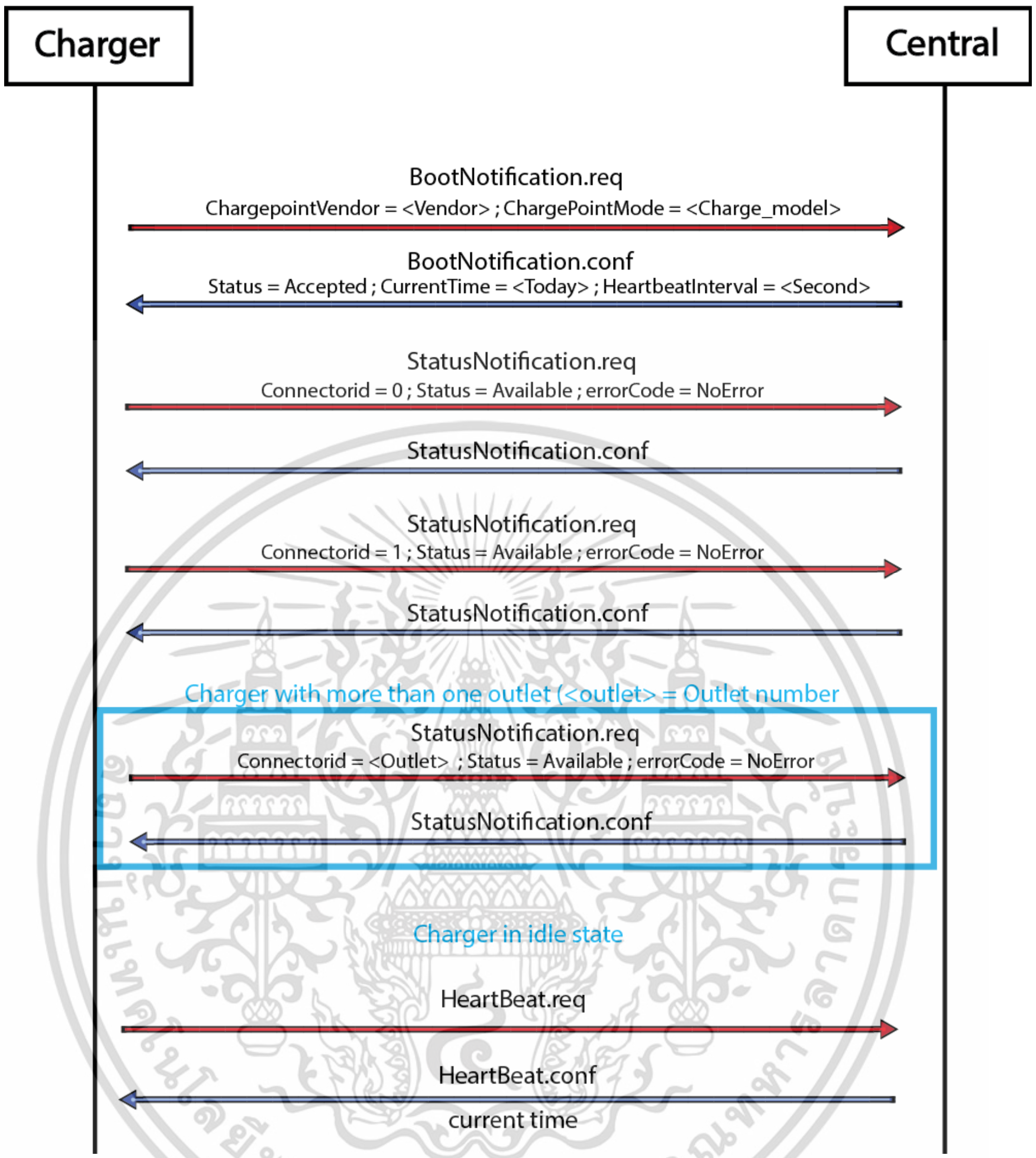
2.3.3.3 Stop Transaction

- Charge id คือ หมายเลขตู้ไฟ
- Transaction id คือ หมายเลขการใช้งาน
- Meter stop คือ ค่าเลขมิเตอร์หลังใช้งาน
- Timestamp คือ เวลาที่เลิกใช้

2.3.4 ไดอะแกรมการทำงานของมาตรฐานการสื่อสารแบบ OCPP

ระบบการสื่อสารแบบ OCPP ระหว่างระบบควบคุมส่วนกลางกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับขั้นตอน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกและทำให้ระบบสามารถเก็บข้อมูลการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งไดอะแกรมการทำงานในขั้นตอนต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ถึงรูปที่ 2.17 โดยในรูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า รูปที่ 2.15 แสดงขั้นตอนการเริ่มและหยุดการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ RFID Card รูปที่ 2.16 แสดงขั้นตอนการเริ่มและหยุดการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรีโมท และรูปที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการเริ่มต้นการปลดล๊อคหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

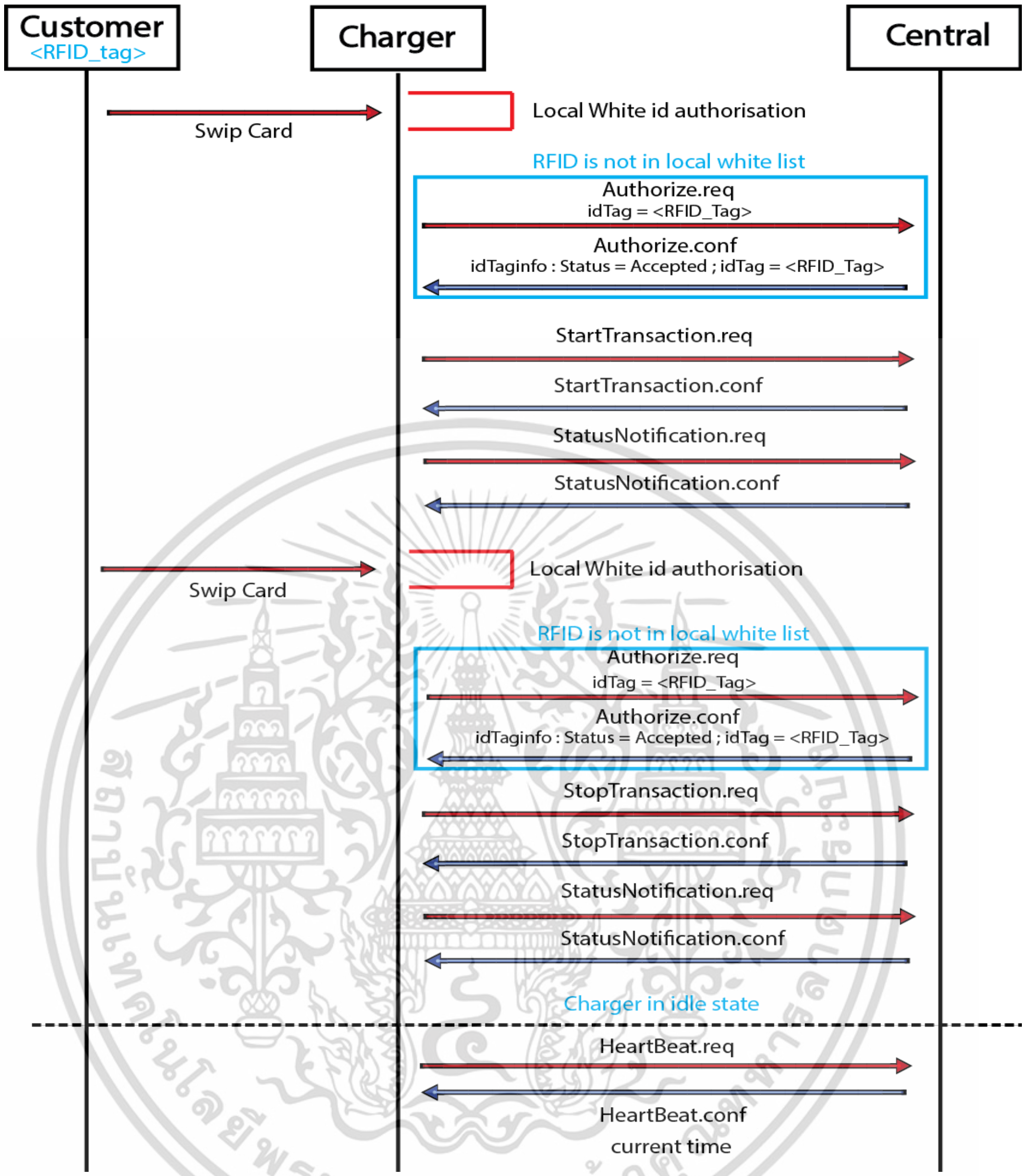
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 Sequence Diagram เริ่มต้นการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

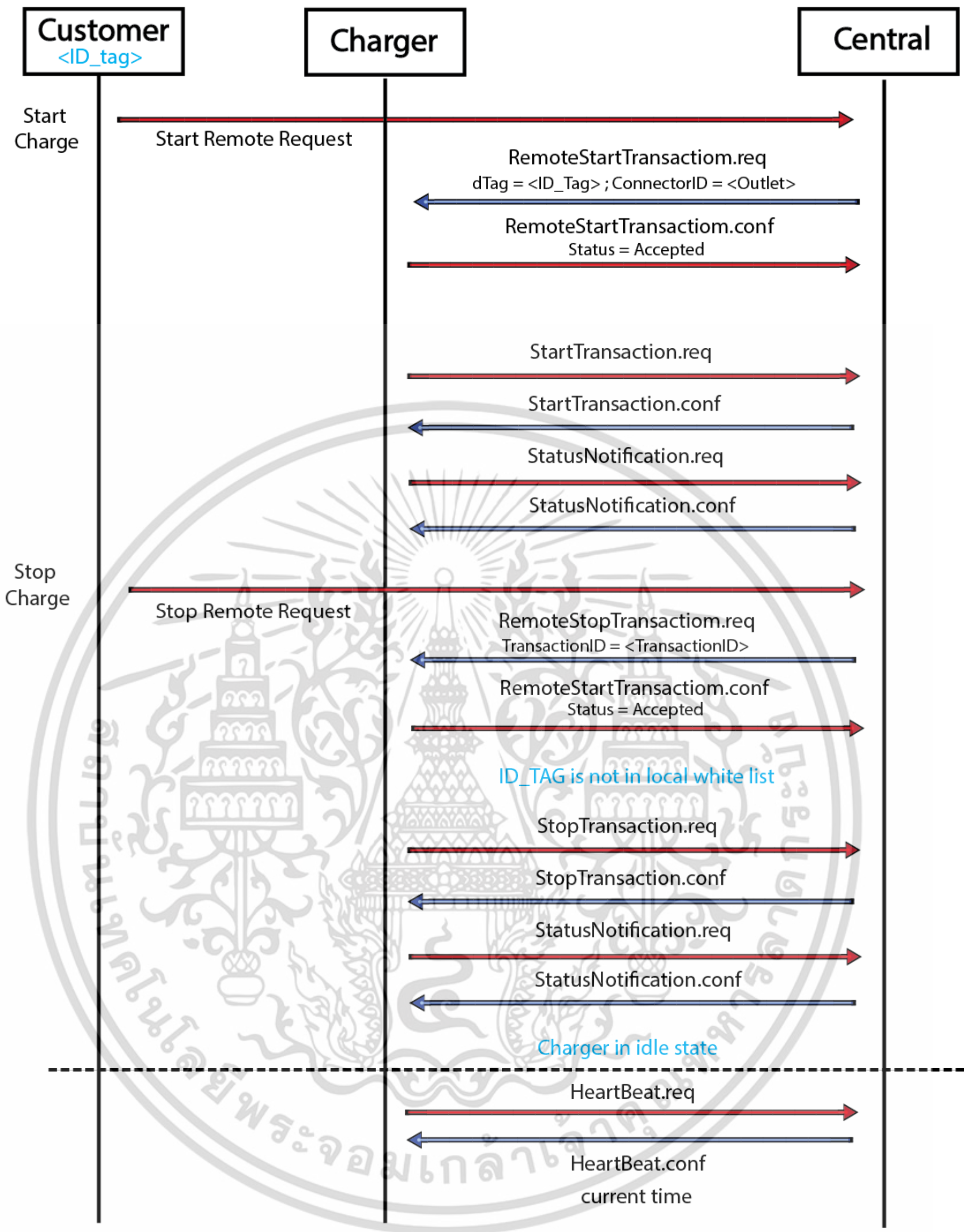
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 Sequence Diagram เริ่มและหยุดการการอัดประจุแบตเตอรี่โดยใช้ RFID Card

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

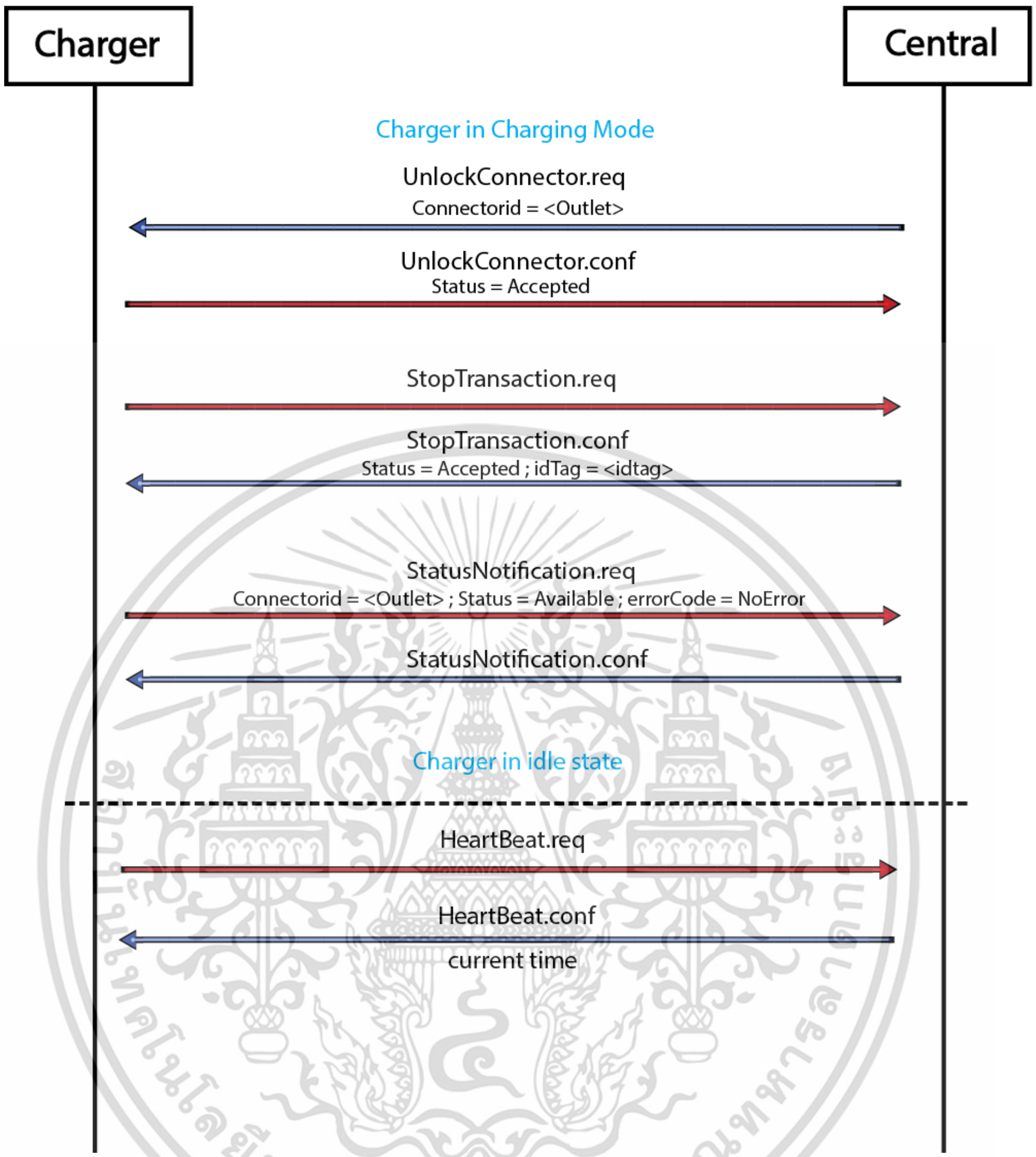
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 Sequence Diagram เริ่มและหยุดการการอัดประจุแบตเตอรี่แบบรีโมท

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



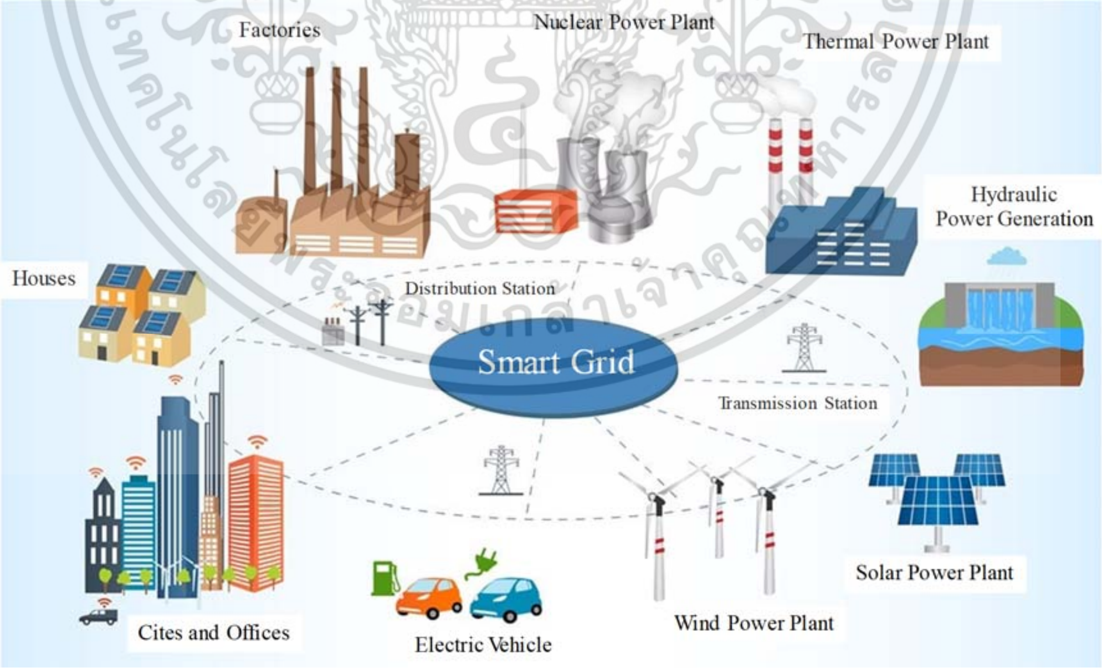
รูปที่ 2.17 Sequence Diagram เริ่มต้นการปลดล็อคหัวอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่อง “ระบบโครงข่ายเครื่องอัดประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของ กฟภ.”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด

การจัดการพลังงานและวิกฤตสิ่งแวดล้อมจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นปัญหาที่ท้าทายในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ที่มีการเชื่อมต่อของแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น รวมทั้งความต้องการใช้งานโหลดที่ไม่แน่นอนและการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่สูง [7]-[12] จากข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไปและความไม่แน่นอนของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณโหลดที่ใช้งาน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก และการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า สิ่งเหล่านี้เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าและการซิงโครไนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด การเพิ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์หรือคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นตัวแปลงผันพลังงานไฟฟ้าของแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกจะทำให้ความเฉื่อยของระบบไฟฟ้าลดลง เสถียรภาพระบบไฟฟ้าลดลง และหากไม่มีการควบคุมการทำงานของระบบอย่างเหมาะสม ระบบไฟฟ้าก็อย่างสูญเสียเสถียรภาพและเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับได้ สำหรับกลยุทธ์หรือเทคนิคที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหานี้ คือ การควบคุมการทำงานแบบประสาน (Coordinated Control) ซึ่งเป็นการควบคุมการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก และการใช้งานโหลดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า [13], [14]



รูปที่ 2.18 ระบบไฟฟ้าที่มีการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนและรถยนต์ไฟฟ้า [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการนำเสนอวิธีการและแนวคิดหลายอย่างเพื่อลดความผันผวนของความถี่ในระบบไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาและจำลองการทำงานในระบบไมโครกริด เนื่องจากระบบไมโครกริดเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก มีความเป็นอิสระจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก มีการตอบสนองที่ดีต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และปริมาณโหลดที่ใช้งานในระบบ สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานได้ และสามารถยืนยันได้ว่าผลการวิจัยหรือผลการจำลองที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำ สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับแนวคิดและกลยุทธ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมความถี่ของระบบไมโครกริดเพื่อให้ระบบมีความเสถียรภาพสามารถแสดงได้ดังนี้

กลยุทธ์การกำหนดเวลารับข้อมูล จากการศึกษาพบว่า ความล่าช้าในการสื่อสารมีผลกระทบต่อการทำงานของตัวควบคุมในระบบไมโครกริด วิธีการกำหนดเวลารับข้อมูลจึงถูกนำมาใช้เพื่อชดเชยผลกระทบของความล่าช้าในการสื่อสาร [15]

กลยุทธ์การควบคุม H∞ และ μ-synthesis เป็นวิธีการควบคุมความถี่ในระบบไมโครกริดที่แข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพ [16] ในการออกแบบระบบควบคุมจะพิจารณาความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผลที่ได้จากการศึกษา พบว่า การควบคุมแบบ μ-synthesis มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุม H∞ อย่างไรก็ตามวิธีการควบคุมที่นำเสนอไว้ใน [15] และ [16] ไม่ได้กล่าวถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

กลยุทธ์การควบคุมของ Tustin เป็นการควบคุมความถี่โหลดแบบกระจายด้วยระบบการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID และใช้หลักการของ Particle Swam Algorithm ในการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด นอกจากนี้ยังพิจารณาความล่าช้าของเวลาที่ใช้ในการสื่อสารในลูปควบคุมด้วย ผลการศึกษาที่ได้ พบว่า ตัวควบคุมแบบดิจิทัลสามารถควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริดได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบอนาล็อก มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า และมีความน่าเชื่อถือมากกว่า [17]

กลยุทธ์การควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้า กลยุทธ์การควบคุมนี้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานระบบไมโครกริดที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำและไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก [18] ผลการจำลองที่ได้ พบว่า ระบบไมโครกริดสามารถกู้คืนความถี่ได้ด้วยการควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Droop Control

กลยุทธ์การควบคุมความถี่โหลดแบบตรวจจับความถี่ของระบบไฟฟ้า วิธีการนี้มีนำเสนอใน [19] ถูกนำไปใช้กับไมโครกริดที่เชื่อมต่อถึงกัน ผลการวิจัย พบว่า การเบี่ยงเบนของความถี่ที่สูงอาจเกิดขึ้นได้จากกำลังไฟฟ้าที่ไม่สมดุลและความล่าช้าของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุม

กลยุทธ์การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG) วิธีการควบคุมนี้ได้ถูกนำเสนอใน [20] ผลการจำลองระบุว่าส่วนควบคุมของ DFIG สามารถมีการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการควบคุมความถี่ และส่งผลให้ความเบี่ยงเบนความถี่ลดลง งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าตัวแปลง DFIG ให้การตอบสนองที่เร็วกว่าโรงไฟฟ้าทั่วไป เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อนและโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในการศึกษายังระบุว่า ความไม่แน่นอนของพลังงานลมอาจส่งผลกระทบต่อความเสถียรของความถี่ H∞ ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาของ [13] ดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้

กลยุทธ์การควบคุมความเฉื่อยของระบบไมโครกริดด้วยการควบคุมแบบโรบัส [21] กลยุทธ์การควบคุมนี้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานระบบไมโครกริดที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า และภายในระบบมีการให้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า สามารถรักษาเสถียรภาพความถี่ของระบบไมโครกริดได้เป็นอย่างดี และเป็นกลยุทธ์ที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ในงานในการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด

นอกจากกลยุทธ์ทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ ยังมีการใช้เทคนิคการควบคุมอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมและใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบการควบคุมให้มีความเหมาะสม เช่น เทคนิคการควบคุมแบบ Load Frequency Control (LFC) [22], [23] เทคนิคการควบคุมแบบ Particle Swarm Optimization (PSO) เทคนิคการควบคุมแบบ Butter Fly Optimization (BO) [24] เทคนิคการควบคุมแบบ Water Cycle Algorithm (WCA) [22] เทคนิคการควบคุมแบบ Yellow Saddle Goatfish Algorithm (YSGA) [25] และเทคนิคการควบคุมแบบ Mine Blast Algorithm (MBA) [23] เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม กลยุทธ์การควบคุมแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ ตัวควบคุมส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้ทำงานในระบบไมโครกริดที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งอาจจะทำงานได้ไม่ดีเมื่อนำมาใช้กับระบบไมโครกริดอื่น ๆ รวมทั้งยังไม่ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดด้วย จุดอ่อนของงานวิจัยที่ได้นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมแบบต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาพบว่า ไม่มีการพิจารณาผลกระทบของการหน่วงเวลาเล็กน้อยในลูปการควบคุม และค่าพารามิเตอร์ (PID) ที่ใช้ในการควบคุมเป็นแบบคงที่ทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริดจริงที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาระบบควบคุมแบบประสานที่มีการควบคุมการทำงานร่วมกันของโหลดต่าง ๆ โรงต้นกำลังไฟฟ้า แหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ และการประยุกต์ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดการออกแบบระบบควบคุมและผลการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกนำเสนอในบทที่ 5 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 บทสรุป

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับหลักการทำงานและรูปแบบการสื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของแต่ละมาตรฐาน (ได้แก่ มาตรฐาน CHAdeMO มาตรฐาน AC Type 2 และมาตรฐาน CCS) และรูปแบบการการสื่อสารแบบ OCPP ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารกลางระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าและเซิฟเวอร์กลางของระบบควบคุม จะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วแบบพัลส์ความถี่ที่รองรับการอัดประจุตามาตรฐาน CHAdeMO และการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard เพื่อใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะมีการนำเสนอต่อไปในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ ส่วนข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีและกลยุทธ์การควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบไมโครกริด จะเป็นพื้นในการออกแบบระบบควบคุม และการศึกษาพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการประยุกต์ใช้งานสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด ซึ่งจะมีการนำเสนอไว้ในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

3.1 บทนำ

จากความต้องการลดมลพิษทางอากาศจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของท่อไอเสียรถยนต์ทำให้แนวโน้มการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้ามีปริมาณที่สูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองขนาดใหญ่ ๆ ซึ่งในปี พ.ศ. 2557 รถยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อ Nissan Leaf มียอดขายสูงถึง 1 แสนคันทั่วโลก และมีการคาดว่าในอีก 5 ปีข้างหน้า จะมีการใช้รถยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกมากกว่า 5 ล้านคัน ในช่วงเวลาดังกล่าว รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในขณะนั้นสามารถวิ่งได้ระยะทางประมาณ 150 กิโลเมตร และใช้เวลาถึง 30 นาทีในการอัดประจุแบตเตอรี่กับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ [26] การลดเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยนี้ สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วซึ่งรองรับการอัดประจุตามมาตรฐาน CHAdeMO และใช้เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่เพื่อลดเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า นอกจากการลดเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแล้ว เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ยังสามารถลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดประจุแบตเตอรี่ให้มีค่าต่ำลง ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ายาวนานขึ้น [27]

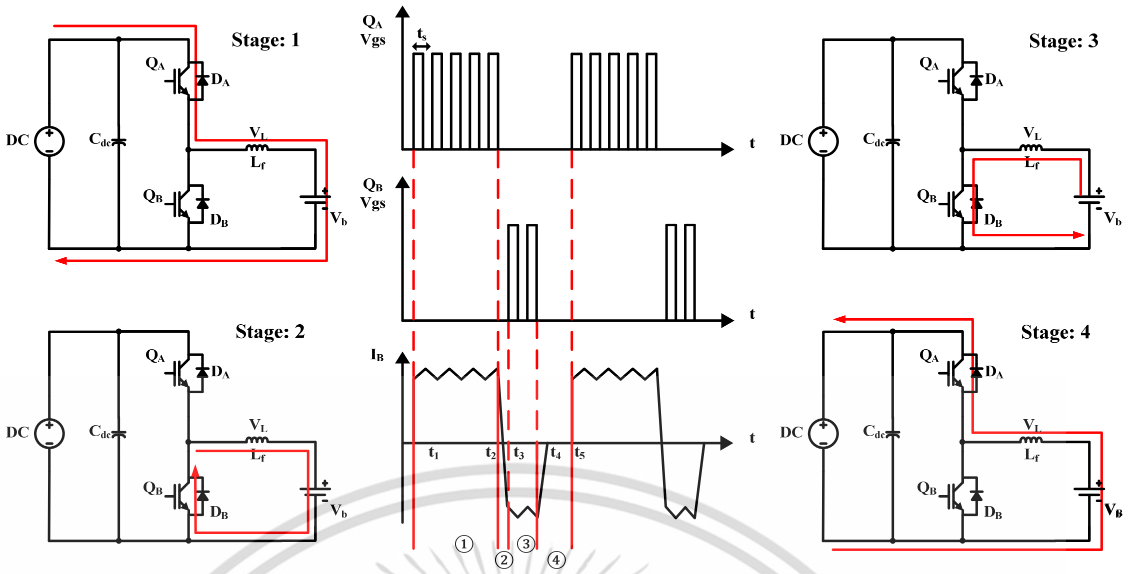
3.2 เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่

การอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ เป็นวิธีการอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันแบบพัลส์ ทำให้สามารถอัดประจุได้เร็วกว่าอัดประจุแบบแรงดันคงที่ และใช้เวลาใกล้เคียงกับการอัดประจุแบบกระแสคงที่ แต่ข้อได้เปรียบของวิธีการอัดประจุแบบพัลส์ที่เหนือกว่าการอัดประจุแบบกระแสคงที่ คือสามารถช่วยระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้ดี ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานมากขึ้นกว่าเดิม การอัดประจุแบบพัลล์ความถี่นั้นสามารถแบ่งโหมดการทำงานออกเป็น 4 โหมด คือ การอัดประจุพัลส์ด้านบวก (Positive Pulse Charging Mode) การชะลอพัลส์ (Delay Mode) การคายประจุพัลส์ด้านลบ (Negative Pulse Discharging Mode) และพักพัลส์ (Rest Mode) ซึ่งการทำงานของวงจรในแต่ละโหมดสามารถแสดงดังรูปที่ 3.1 [6]

1) ช่วงการอัดประจุพัลส์ด้านบวก

การทำงานในโหมดนี้ (ช่วง T_1-T_2) จะใช้วงจรลดทอนระดับแรงดัน โดยให้สวิตช์ Q_A ทำงานและสวิตช์ Q_B ไม่ทำงาน สามารถปรับดิวตี้ไซเคิลได้ที่สวิตช์ Q_A แสดงดังรูปที่ 3.1 เมื่อสวิตช์ Q_A หยุดทำงาน แต่ D_B ทำงาน จะทำให้เกิด Free-wheeling Diode ตัวเหนี่ยวนำจะคายพลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสามารถวิเคราะห์การทำงานได้ดังสมการที่ (3.1) ถึง (3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การทำงานของวงจรในแต่ละโหมดของเทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ [26]

$$Q_A\ on\ : V_L = V_{dc} - V_R \qquad (V) \tag{3.1}$$

$$Q_A\ off : V_L = -V_B - V_R \qquad (V) \tag{3.2}$$

อินทิเกรตค่าของ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V_L) ในช่วงเวลาหนึ่งคาบจะมีค่าเป็น 0

$$\int_0^{T_s} V_L dt = \int_0^{t_{on}} V_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} V_L dt = 0 \tag{3.3}$$

$$V_B = D_1 V_{dc} \qquad (V) \tag{3.4}$$

กระแสไฟฟ้าอัดประจุของตัวเหนี่ยวนำ

$$i_L = \frac{1}{L}\int_{T_1}^{T_{on}} V_L dt + i_{LT_1} \qquad (A) \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การชะลอพัลส์

เมื่อเข้าสู่โหมดการทำงานนี้ (ช่วง T_2-T_3) สวิตช์ Q_A และ Q_B จะไม่ทำงาน กระแสไฟฟ้า I_B จะลดลงเป็นศูนย์ โดย Free-wheeling Diode ของ D_B หลังจากเข้าสู่โหมดนี้ สวิตช์ Q_B จะทำงานจนกว่ากระแสไฟฟ้าการคายประจุสูงสุดในด้านลบ แล้วสวิตช์ Q_B จะทำงานในช่วงคายประจุพัลล์ความถี่ด้านลบต่อไป

3) การคายประจุพัลส์ด้านลบ

การทำงานในโหมดนี้แบตเตอรี่จะเกิดกระแสไฟฟ้าคายประจุชั่วขณะและพลังงานที่เก็บสะสมจะถูกปล่อยออกไปยังตัวเก็บประจุของวงจร (ช่วง T_3-T_4) การคายประจุในช่วงนี้จะใช้วงจรทบระดับแรงดันโดยสวิตช์ Q_A จะไม่ทำงาน ส่วนสวิตช์ Q_B จะทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.1 ต่อมาแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะไปสะสมที่ตัวเหนี่ยวนำ เวลานี้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแบตเตอรี่ไปที่แหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์ Q_B หยุดทำงาน แต่ D_A ทำงาน จะทำให้เกิดการ Free-wheeling Diode พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมไว้ในตัวเหนี่ยวนำจะถูกปล่อยออกมาดังแสดงในรูปที่ 3.1 สามารถวิเคราะห์การทำงานได้ดังสมการที่ (3.6) ถึง (3.10)

$$Q_B\ on\quad : V_L = V_B - V_R \qquad (\mathrm{V}) \tag{3.6}$$

$$Q_B\ off : V_L = V_B - V_{dc} - V_R \qquad (\mathrm{V}) \tag{3.7}$$

อินทิเกรตค่าของ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V_L) ในช่วงเวลาหนึ่งคาบจะมีค่าเป็น 0

$$\int_0^{T_s} V_L dt = \int_0^{t_{on}} V_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} V_L dt = 0 \tag{3.8}$$

$$V_{dc} = \frac{V_B}{1-D_2} \qquad (\mathrm{V}) \tag{3.9}$$

กระแสไฟฟ้าคายประจุของตัวเหนี่ยวนำ

$$i_L = \frac{1}{L}\int_{T_3}^{T_{on}} V_L dt + i_{LT_3} \qquad (\mathrm{A}) \tag{3.10}$$

4) การช่วงพักพัลส์

เมื่อเข้าสู่โหมดนี้ (ช่วง T_4-T_5) สวิตช์ Q_A และ Q_B จะไม่ทำงาน กระแสอัดประจุ I_B จะกลับไปที่ศูนย์โดย Free-wheeling Diode ของ D_A

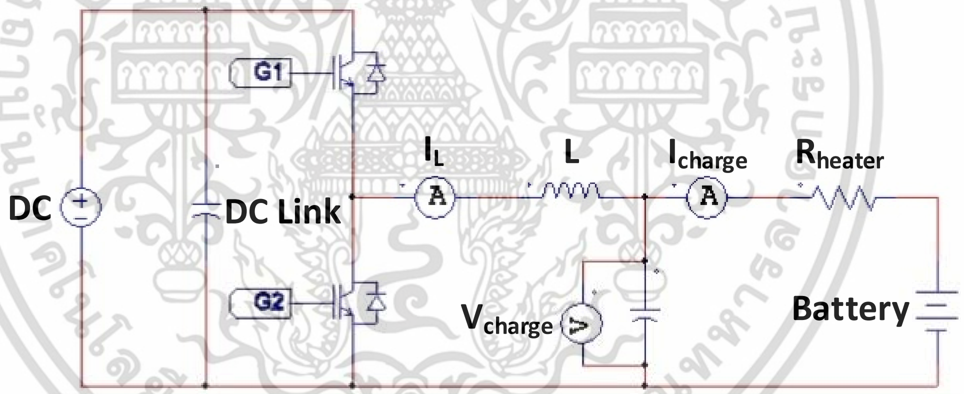
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชุดทดสอบเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

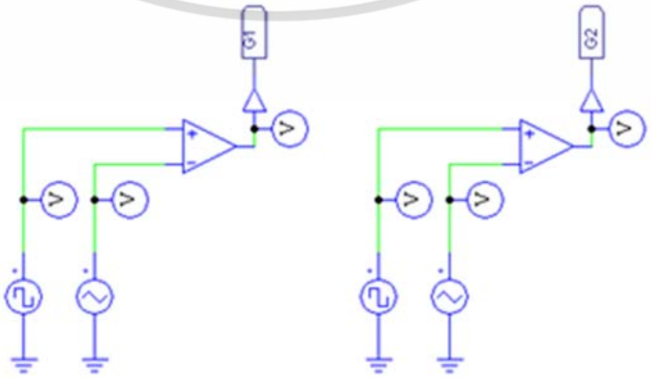
เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการสร้างเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งดำเนินการร่วมกับคณะวิจัยของห้องปฏิบัติการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยใช้โปรแกรม PSIM (Power Simulation) เวอร์ชั่น 9.0.3 ในการจำลองการทำงาน เพื่อตรวจสอบการทำงานที่สภาวะต่าง ๆ และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวงจร ก่อนที่จะทำการสร้างและทดสอบการทำงานจริงของเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

3.3.1 การจำลองการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

วงจรที่ใช้จำลองการทำงานในโหมดการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 โดยรูปที่ 3.2 จะเป็นภาคของวงจรกำลัง ส่วนรูปที่ 3.3 จะเป็นวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมการขับสวิตช์กำลัง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และผลที่ได้จากการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ [28]

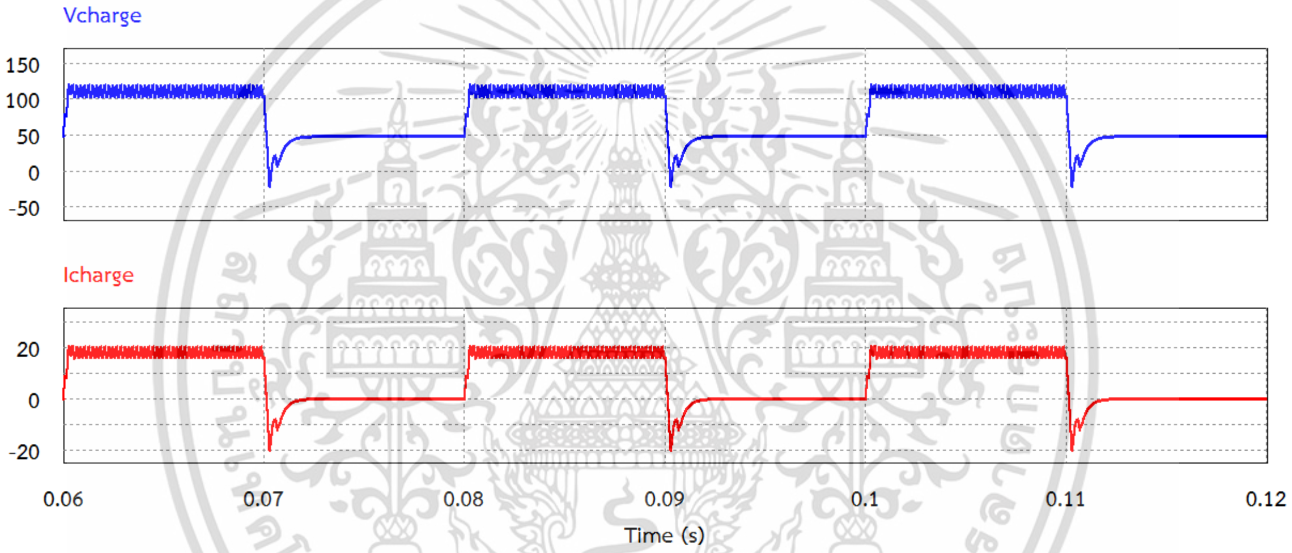


รูปที่ 3.3 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง [28]

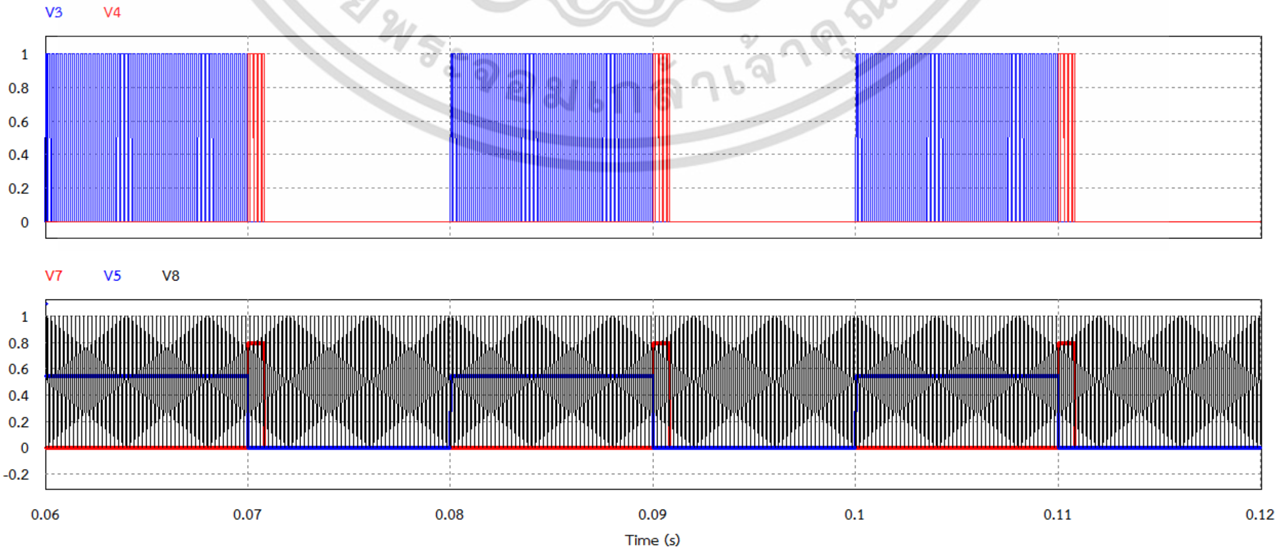
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความถี่ในการสวิตซิ่ง G1 / G2	5 kHz
แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	150 V
ตัวเก็บประจุ DC-link	10,000 μF
Inductance (L)	100 μH
Capacitance (C)	90 μF
แรงดันแบตเตอรี่	48 V
ความต้านทาน (Heater)	3.5 Ω

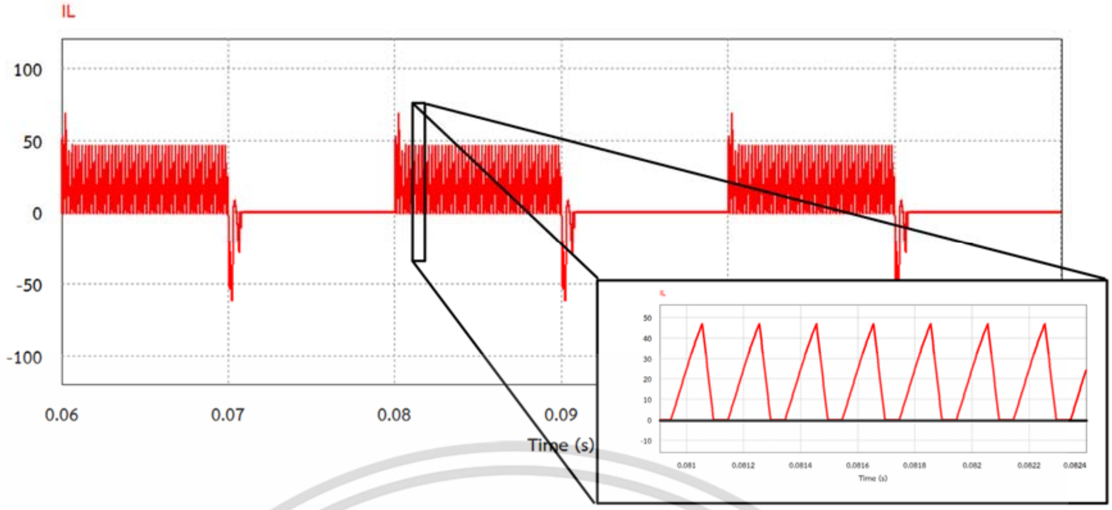


รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ [28]



รูปที่ 3.5 สัญญาณขับสวิตช์กำลัง [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจร [28]

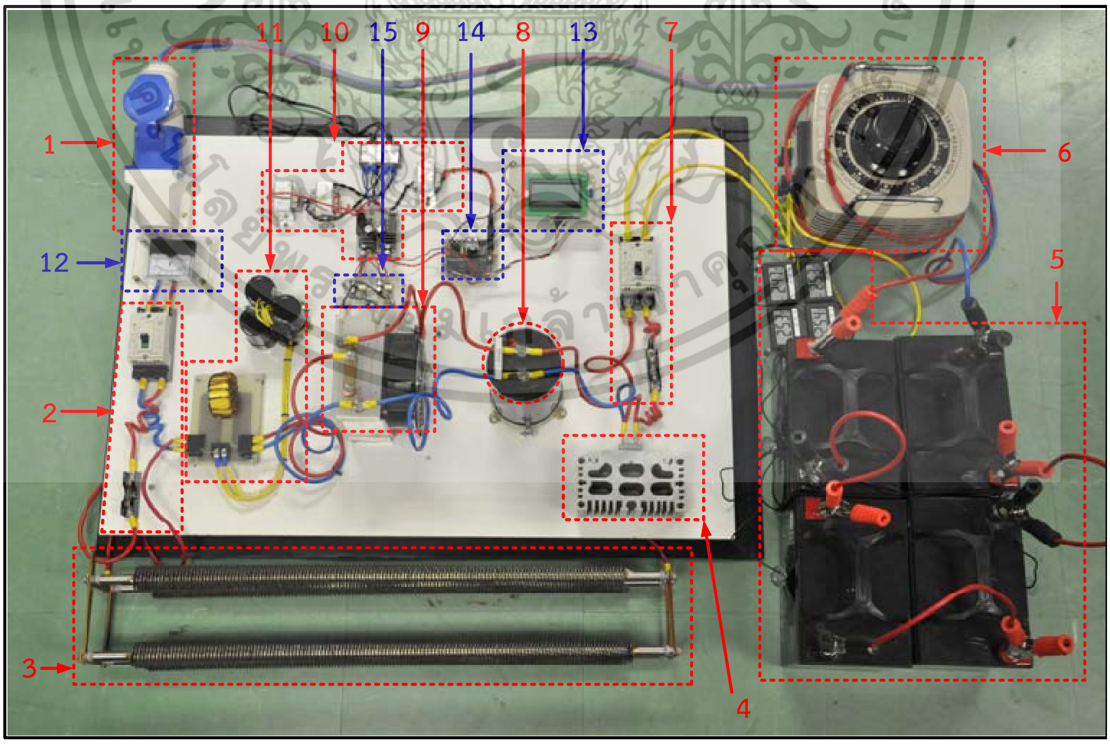
รูปที่ 3.4 แสดงผลการจำลองการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ โดยมีค่ากระแสพัลส์ด้านบวกประมาณ 20 A มีค่ากระแสพัลส์ด้านลบ 20 A และมีค่ากระแสอัดประจุเฉลี่ยประมาณ 8.2 A มีค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ด้านบวก (Ma+) เท่ากับ 0.55 และมีค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ด้านลบ (Ma-) เท่ากับ 0.8 จะเห็นได้ว่า ผลการจำลองที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี คือ การอัดประจุจะถูกแบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงาน ได้แก่ โหมดการอัดประจุพัลส์ด้านบวก โหมดชะลอพัลส์ โหมดการคายประจุพัลส์ด้านลบ และโหมดพักพัลส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับการทำงานของสวิตช์กำลังทั้งสองตัว โดยการทำงานของสวิตช์กำลังนั้นจะเป็นไปตามสัญญาณควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.5 และปริมาณของกระแสที่อัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับการออกแบบเวลาสำหรับการทำงานของสวิตช์กำลังทั้ง 2 ตัว ซึ่งการอัดประจุแบบพัลส์สามารถทำการอัดประจุด้วยแรงดันที่สูงกว่าการอัดประจุปกติด้วยแรงดันปกติได้ เนื่องจากมีช่วงที่แบตเตอรี่ได้ลดความเครียดสะสม

3.3.2 เครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

การออกแบบเครื่องอัดประจุที่ใช้เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่จะคล้ายกับเทคนิคการอัดประจุแบบปกติ คือ ใช้หลักการทำงานของวงจรบั๊ค-บูสคอนเวอร์เตอร์ แต่เนื่องจากเทคนิคการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่นั้น จำเป็นต้องให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode) ดังนั้น การออกแบบจะต้องเลือกค่าความเหนี่ยวนำและขนาดของตัวเก็บประจุให้มีค่าเหมาะสม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเอาท์พุทเป็นแบบพัลส์ สำหรับความถี่การสวิตชิ่งที่ใช้ในการอัดประจุจะมีค่าคงที่ แต่สามารถปรับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ได้ (Ma) เพื่อควบคุมปริมาณกระแสพัลส์ช่วงบวก ซึ่งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 และมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

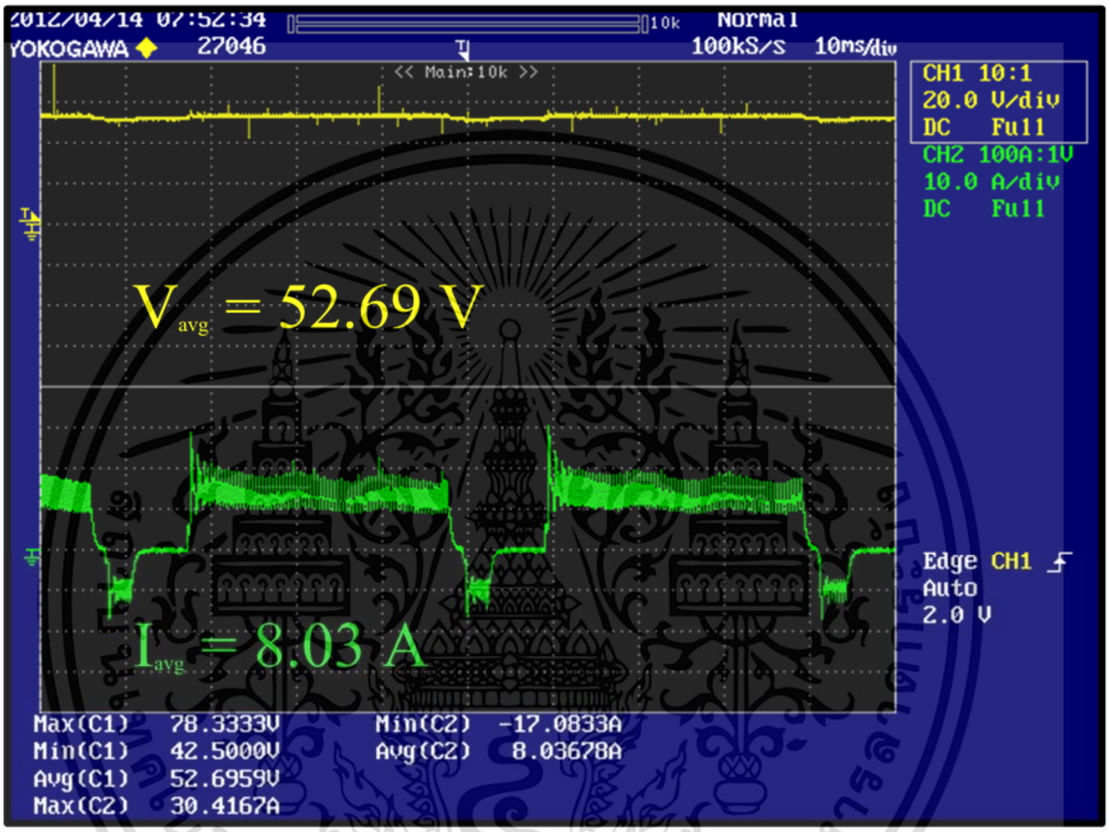
1. Plug – in ต่อกับแบตเตอรี่
2. ชุดป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน ด้านเอาท์พุท จำนวน 1 ชุด
3. R_{Heater} 3.5 Ω
4. Bridge Diode
5. แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 33 แอมป์ชั่วโมง ทั้งหมด 4 ลูก
6. Variac
7. ชุดป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน ด้านอินพุท จำนวน 1 ชุด
8. ตัวเก็บประจุ 10,000 ไมโครฟารัด
9. ชุดวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ จำนวน 1 ชุด
10. ชุดแหล่งจ่ายไฟ +5 โวลต์ 300 มิลลิแอมป์ จำนวน 1 ชุด
    +20 โวลต์ 300 มิลลิแอมป์ จำนวน 2 ชุด
11. ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ โหมดการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่
12. มาตรวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง จำนวน 1 ชุด
13. ชุดหน้าจอแสดงผล จำนวน 1 ชุด
14. ชุดวงจรควบคุม จำนวน 1 ชุด
15. ชุดวงจรขับสวิตซ์กำลัง จำนวน 2 ชุด



รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้งานเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ในรูปที่ 3.8 เป็นผลการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่อัดประจุแบตเตอรี่ขนาด 12 V 33 Ah จำนวน 4 ลูก ต่อแบบอนุกรมกัน พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยและค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 52.69 V และ 8.03 A ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบเป็นไปตามทฤษฎีและผลการจำลองดังที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้



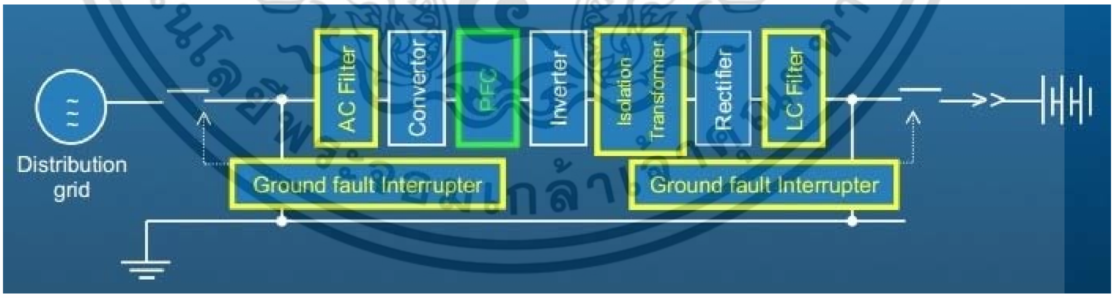
รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่สำหรับใช้งานกับรถยนต์ไฟฟ้าให้มีความจุสูงขึ้นและสามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีการออกแบบสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงแบบต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมาย โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- วงจรกรองความถี่กระแสสลับ (AC Line Filter) ทำหน้าที่กรองฮาร์มอนิกส์จากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ไม่ให้ออกไปสู่ระบบไฟฟ้าภายนอก
- วงจรเรียงกระแส (Convertor) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- ชุดควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า (Power Fraction Correction) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแส เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
- วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่สูง
- หม้อแปลงไฟฟ้าแยกกราวด์ (Isolation Transformer) ทำหน้าที่แยกกราวด์ระหว่างระบบไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุกับระบบไฟในรถยนต์ไฟฟ้า
- วงจรกรองความถี่กระแสตรง (LC Filter) ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้เรียบก่อนนำไปอัดประจุแบตเตอรี่
- ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้ารั่ว (Ground fault Interrupter) ทำหน้าที่ตรวจสอบกระแสไฟฟ้ารั่วของทั้งสองระบบและตัดการทำงาน

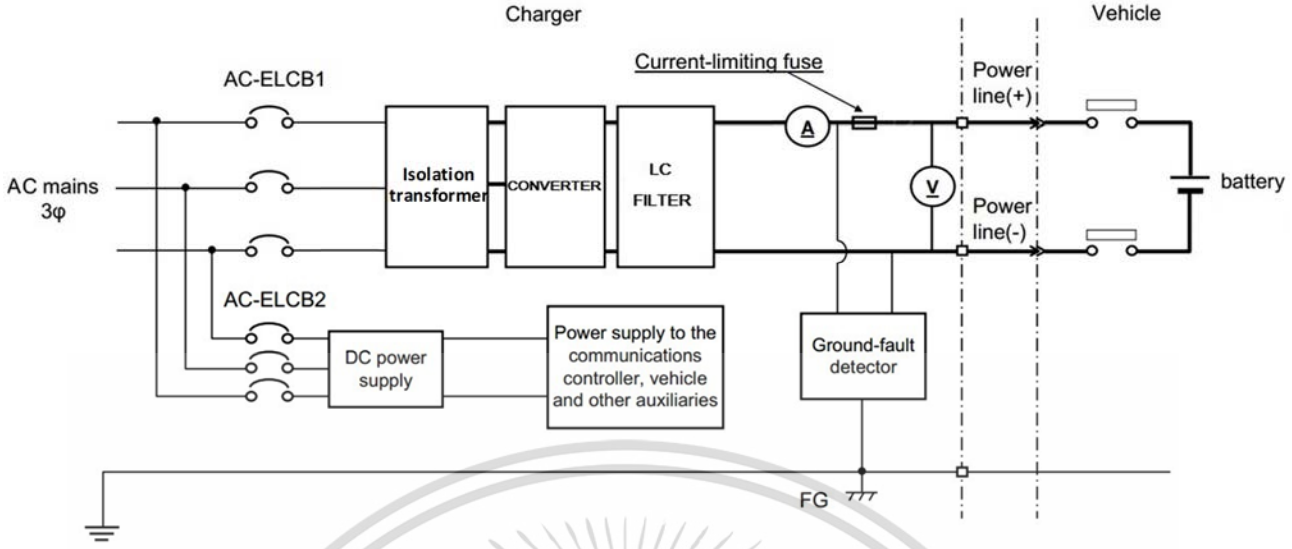


รูปที่ 3.9 โครงสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป [6]

3.4.1 การออกแบบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่

เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีลักษณะคล้ายกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป แต่มีลักษณะพิเศษคือสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ได้ สามารถจ่ายไฟลบได้ และสามารถดึงพลังงานไฟฟ้าจากรถยนต์ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (V2G) เพื่อใช้ในกรณีที่มีพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอหรือเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับระบบไฟฟ้า ซึ่งวงจรเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่ได้ทำการออกแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่ได้ทำการออกแบบ [6]

จากรูปที่ 3.10 สามารถอธิบายส่วนประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ของวงจรได้ดังนี้

1) เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสสลับ (AC Circuit Breaker) แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ AC-ELCB1 ใช้เปิดปิดวงจรหลักและ AC-ELCE2 ใช้เปิดปิดวงจรควบคุม
2) หม้อแปลงไฟฟ้าแยกกราวด์ (Isolation Transformer) ทำหน้าที่แยกกราวด์ระหว่างระบบไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุกับระบบไฟในรถยนต์ไฟฟ้า
3) วงจรเรียงกระแส (Converter) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการอัดประจุ
4) วงจรกรองความถี่กระแสตรง (LC Filter) ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้เรียบก่อนอัดประจุแบตเตอรี่
5) ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้ารั่ว (Ground fault Interrupter) ทำหน้าที่ตรวจค่ากระแสไฟฟ้ารั่วของรถยนต์ไฟฟ้าและตัดการทำงาน
6) แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) ทำหน้าที่เชื่อมต่อวงจรของเรื่องอัดประจุเข้ากับแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า

ซึ่งพิกัดกำลังและรายละเอียดเพิ่มเติมในส่วนอื่น ๆ ของเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่ออกแบบสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

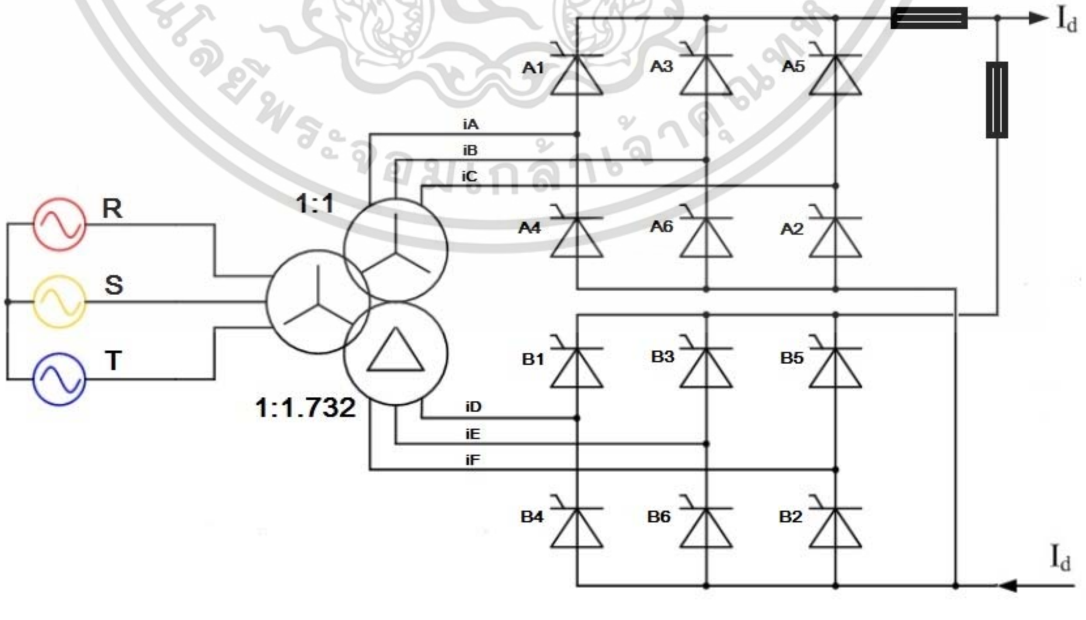
- มาตรฐานการอัดประจุ : CHAdeMO
- มาตรฐานการอัดประจุแบบพัลส์ : CHAdeMO
- หน้าจอผู้ใช้งาน : SIEMENS Color LCD and Emergency buttons

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 50 kW
- กระแสไฟฟ้าด้านออกสูงสุดซีกบวก 120 A, กระแสไฟฟ้าด้านออกสูงสุดซีกลบ 120A
- แรงดันไฟฟ้าด้านออกซีกบวก 500 V, แรงดันไฟฟ้าด้านออกซีกลบ 500 V
- มีระบบป้องกันกระแสเกิน
- มีระบบตรวจจับความผิดปกติของระบบกราวด์

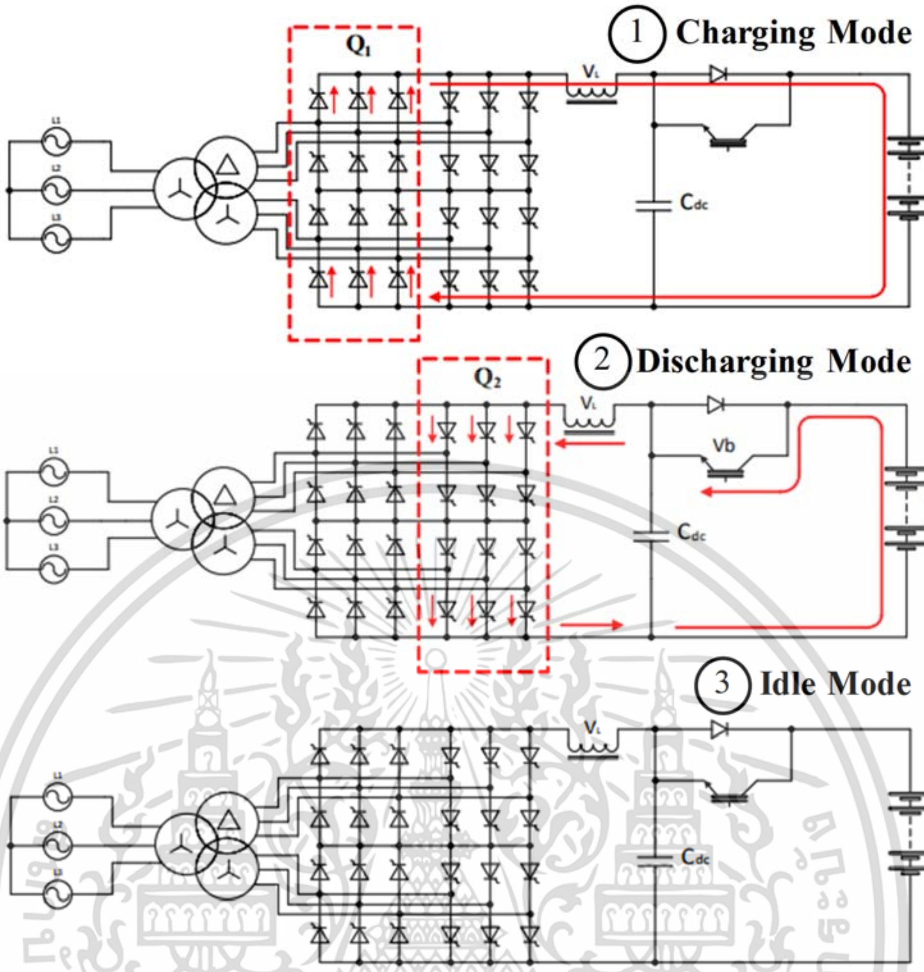
3.4.2 วงจรกำลังและการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้งานกับเครื่องอัดประจุแบบพัลส์ความถี่เป็นวงจรแบบหลายอินพุตหลายเอาท์พุต (Multiples Converter) ชนิด 12 พัลส์ อาศัยการควบคุมแบบเฟส (Phase Control) ซึ่งมีข้อดี คือ มีการควบคุมการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและมีค่าฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำ ภายในวงจรประกอบด้วยหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบสตาร์และเดลต้าซึ่งมีเฟสต่างกัน 30 องศา และมีอัตราส่วนการพันขดลวดของแบบสตาร์เท่ากับ 1:1 ส่วนแบบเดลต้าเท่ากับ 1:1.172 เพื่อให้ได้อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกเท่ากัน จากนั้นจึงใช้ชุดวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ ที่ใช้สวิตช์กำลังไทริสเตอร์ (SCR) จำนวน 6 ตัว 2 ชุดต่อร่วมกัน โดยวงจรเรียงกระแส ชุดที่ 1 ประกอบด้วยสวิตช์ A1-A6 ส่วนชุดที่ 2 ประกอบด้วยสวิตช์ B1-B6 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งโหมดการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 ตามลำดับ และสามารถแสดงการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกส์ของวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจร และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าได้ดังนี้

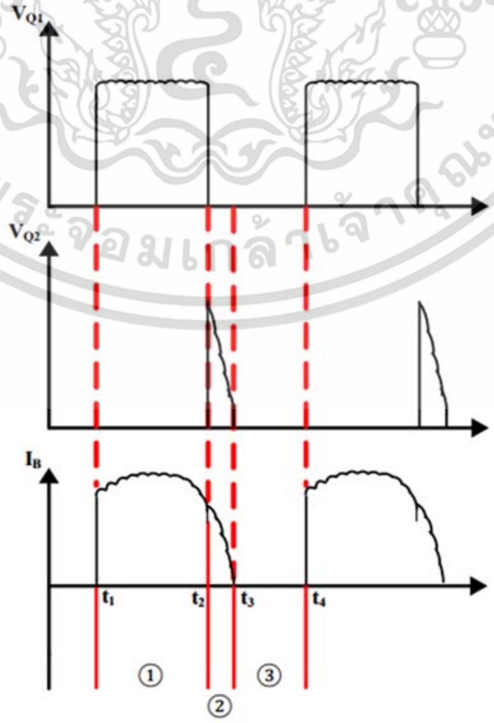


รูปที่ 3.11 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 โหมดการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ [27]



รูปที่ 3.13 สถานะการทำงานทั้ง 3 โหมดของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.1 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของวงจร

กระแสไฟฟ้าด้านอินพุทของวงจรเรียงกระแสชุดที่ 1 ได้แก่ i_A , i_B , i_C จะมีรูปร่างเหมือนกับวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ แต่จะมีเฟสห่างกันอยู่ 120 องศา เช่นเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าด้านอินพุทของ i_D, i_E และ i_F ของวงจรเรียงกระแสชุดที่ 2 จะมีเฟสห่างกันอยู่ 120 องศา แต่ว่ากระแส i_D จะล้าหลังกระแส i_A อยู่ 30 องศา ซึ่งในเฟสอื่น ๆ ก็เช่นเดียวกัน สามารถแสดงผลรวมกระแสด้านเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า i_R ได้ดังนี้

$$i_R = i_A + \frac{1}{\sqrt{3}}(i_D - i_E) \qquad \text{(A)} \tag{3.11}$$

เมื่อพิจารณาฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 จะได้

$$i_A^5 = I\sin(5\omega t) \qquad \text{(A)} \tag{3.12}$$

$$i_D^5 = I\sin[5(\omega t - \frac{\pi}{6})] \qquad \text{(A)} \tag{3.13}$$

$$i_E^5 = I\sin[5(\omega t - \frac{5\pi}{6})] \qquad \text{(A)} \tag{3.14}$$

แทนค่า i_A^5, i_D^5, i_E^5 ลงในสมการที่ (3.11) จะได้ค่า $i_A^5 = 0$ ทำเช่นเดียวกันกับฮาร์มอนิกส์ลำดับอื่น ๆ จะพบว่า ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7^{th}, 17^{th}, 19^{th} และ อีกหลาย ๆ ลำดับมีค่าเป็นศูนย์ โดยสามารถเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายอินพุตหลายเอาท์พุตทั้งแบบ 6 พัลส์ 12 พัลส์ และ 18 พัลส์ ได้ดังตารางที่ 3.2 โดยคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์จะมีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยมีค่าฮาร์มอนิกส์ต่ำเมื่อเทียบกับแบบ 6 พัลส์ แต่ใช้สวิตช์กำลังน้อยกว่าแบบ 18 พัลส์ ทำให้วงจรคอนแวอร์เตอร์มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์

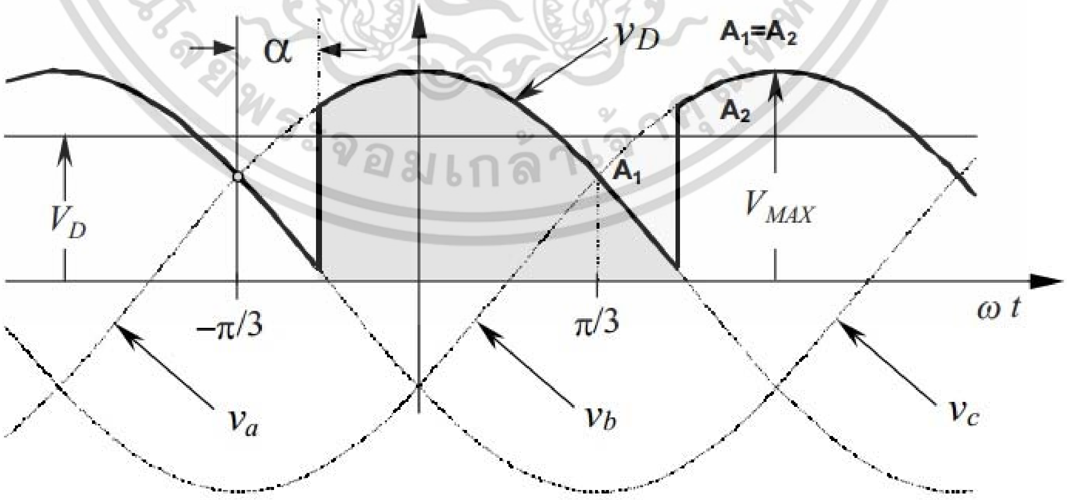
3.4.2.2 การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจร (V_D)

หลักการของ Phase Control สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้โดยการปรับค่าของมุม α (Firing Angle) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เมื่อค่ามุมนี้น้อยลงจะทำให้พื้นที่ที่แรเงา (V_D) มีค่ามากขึ้นและแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จะมีค่าสูงตามไปด้วย แต่เมื่อค่ามุม α มีค่ามากขึ้นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะน้อยลง โดยทั่วไปสามารถปรับค่ามุม α ได้ตั้งแต่ค่ามุม 180 องศา ไปจนถึงค่ามุม 0 องศา แต่ในทางปฏิบัตินั้น ถ้าเป็นวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ทิศทางเดียวควรจะใช้มุมเฟสไม่น้อยกว่า 5 องศา แต่ถ้าเป็นแบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้สองทิศทางจะต้องใช้มุม α ไม่น้อยกว่า 30 องศา ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เมื่อต้องการเปลี่ยนทิศทางการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในทันทีมุม α นี้จะต้องไปขับในทิศที่กลับกันแล้วยังต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้ได้อีกด้วย ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายอินพุตหลายเอาท์พุตทั้งแบบ 6 พัลส์ 12 พัลส์ และ 18 พัลส์

Harmonic Number	Typical Harmonics by Rectifier Type		
	6-pulse	12-pulse	18-pulse
5th	✓		
7th	✓		
11th	✓	✓	
13th	✓	✓	
17th	✓		✓
19th	✓		✓
23rd	✓	✓	
25th	✓	✓	
29th	✓		
31st	✓		
35th	✓	✓	✓
37th	✓	✓	✓



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสกับค่าแรงดันด้านออก (V_D) [6]

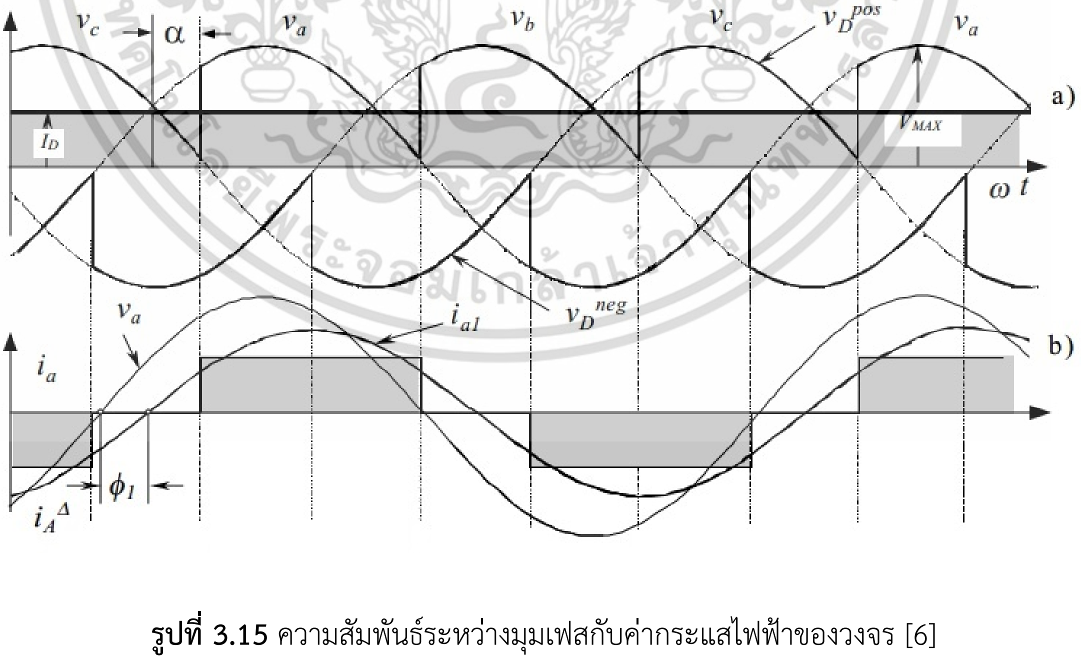
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_D = \frac{V_{MAX}}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \cos \omega t \cdot d(\omega t) = V_{MAX} \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} \cdot \cos \alpha \approx 1.35 \cdot V_{f-N}^{rms} \cdot \cos \alpha \quad (V) \ (3.15)$$

ในการออกแบบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่นี้ต้องการแรงดันด้านไฟฟ้ากระแสตรงที่ 500 Vdc โดยมุมเฟสที่ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ มุม α เท่ากับ 30 องศา จึงสามารถออกแบบค่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าได้อย่างถูกต้อง จากสมการที่ (3.15) แทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ คือ 417.08 Vac เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าที่ต่อเนื่องจำเป็นต้องใช้มุม α น้อยกว่า 60 องศา แรงดันไฟฟ้าจะเหลือประมาณ 281.5 Vac และเพื่อให้สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ได้ตามที่ออกแบบไว้จำเป็นต้องลดอัตราส่วนใหม่เพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 50 Vdc ซึ่งมุม α เท่ากับ 60 องศา แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับ 74.07 Vac ดังนั้น จึงมีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีแทปตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวนได้

3.4.2.3 การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.15 เมื่อปรับค่าของแรงดันไฟฟ้าจะเห็นว่าค่ามุมเฟสของกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปด้วย โดยแปรผันตามค่าของมุมเฟส หรือ มุม α ซึ่งมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจร ดังนั้น มุม α ที่ออกแบบจำเป็นต้องมีค่าใกล้เคียงมุมศูนย์มากที่สุด แต่ต้องเผื่อไว้ให้สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการด้วย

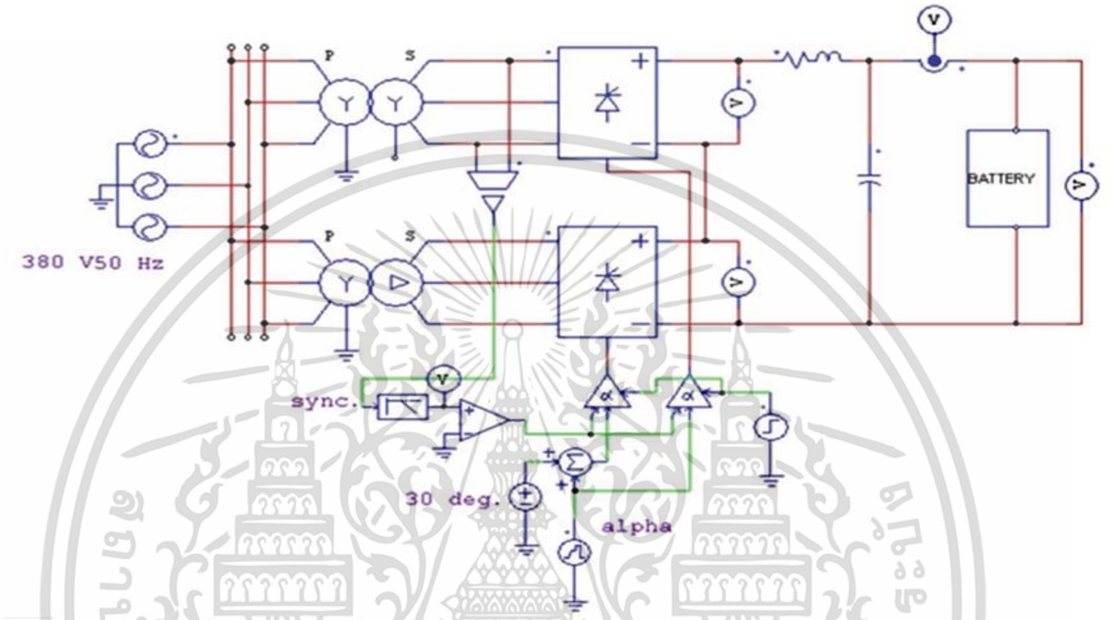


รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสกับค่ากระแสไฟฟ้าของวงจร [6]

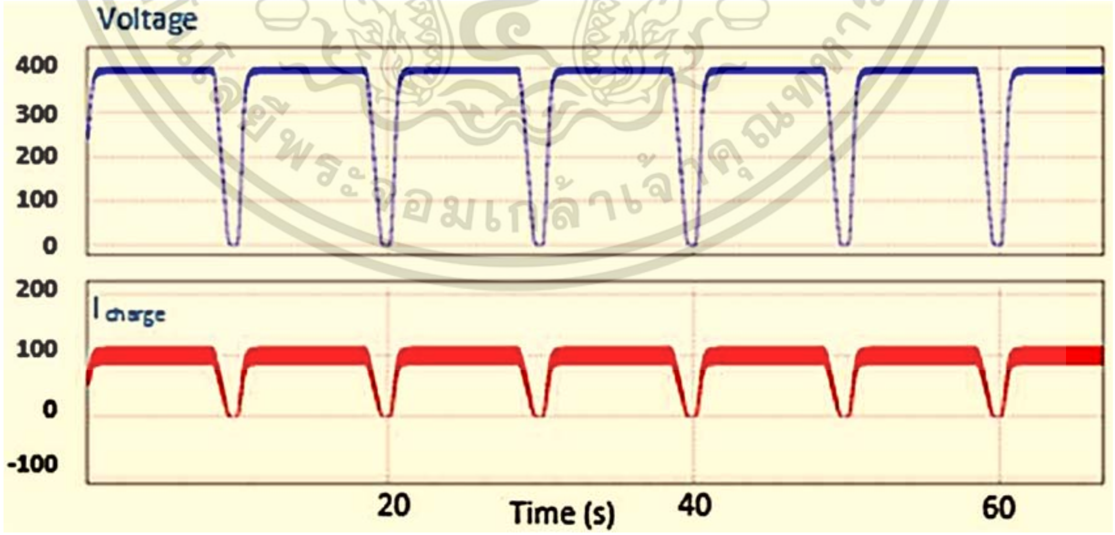
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การจำลองการทำงานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการจำลองการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่จะใช้โปรแกรม PSIM (Power Simulation) เวอร์ชั่น 9.0.3 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 และผลการจำลองการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 ตามลำดับ

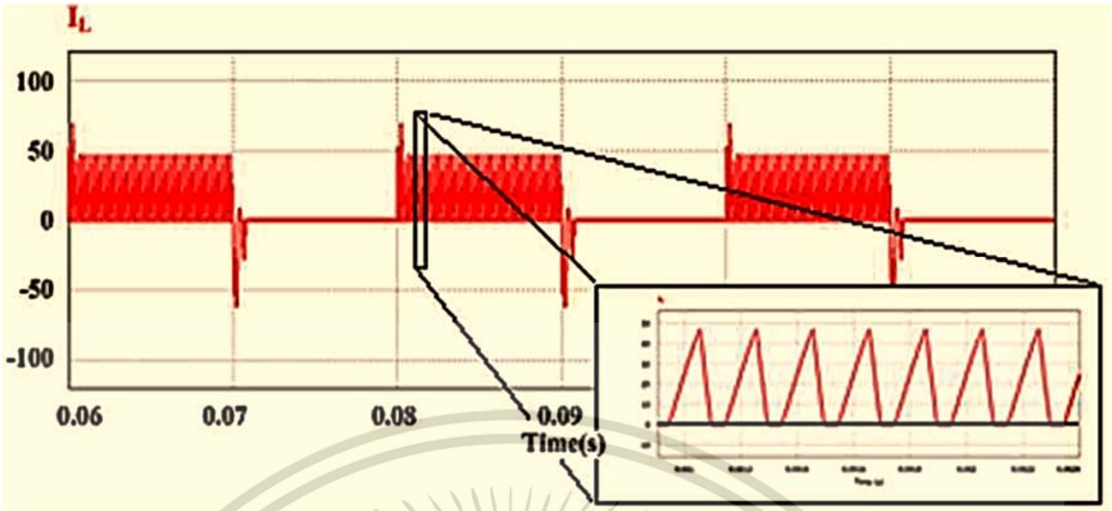


รูปที่ 3.16 วงจรที่ใช้จำลองการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ [26]



รูปที่ 3.17 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการทำงานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 กระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่ได้จากการจำลอง [26]

จากผลการจำลองการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จะพบว่า ผลการจำลองที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ศึกษาและการออกแบบที่นำเสนอไปก่อนหน้านี้ คือ การอัดประจุแบตเตอรี่จะมีลักษณะเป็นพัลส์ความถี่ โดยมีช่วงเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 8 วินาที และมีช่วงพักการอัดประจุแบตเตอรี่ 2 วินาที ซึ่งคาบเวลาการอัดประจุ 8 วินาทีและพัก 2 วินาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากคาบเวลานี้จะใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ต่ำสุด เพราะสามารถจ่ายกระแสให้กับแบตเตอรี่ได้ในปริมาณที่มาก โดยไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของแบตเตอรี่ในขณะที่ทำการอัดประจุ

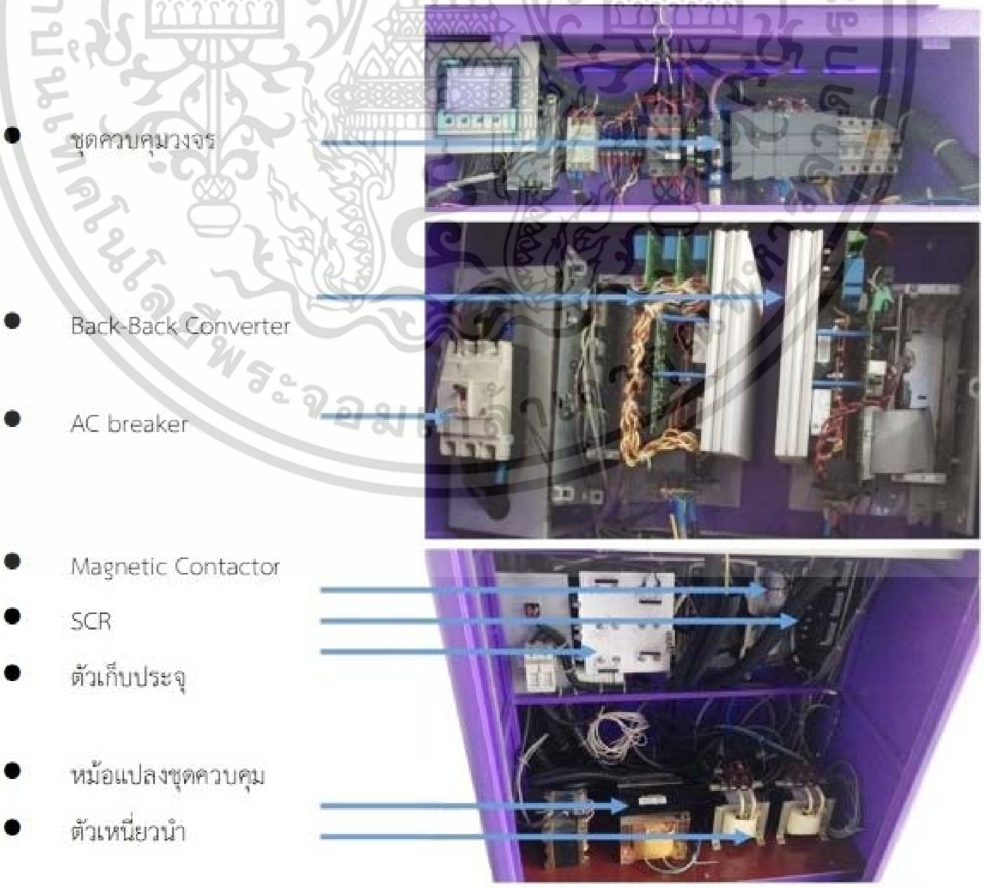
เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 3.18 จะพบว่า การไหลของกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำมีลักษณะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเอาท์พุทมีลักษณะเป็นแบบพัลส์

3.4.4 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน CHAdeMO โดยได้รับทุนการสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) สำหรับโครงสร้างและการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบจะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งตัวเครื่องและส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 และสามารถแสดงข้อมูลทางเทคนิคได้ดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ



รูปที่ 3.20 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

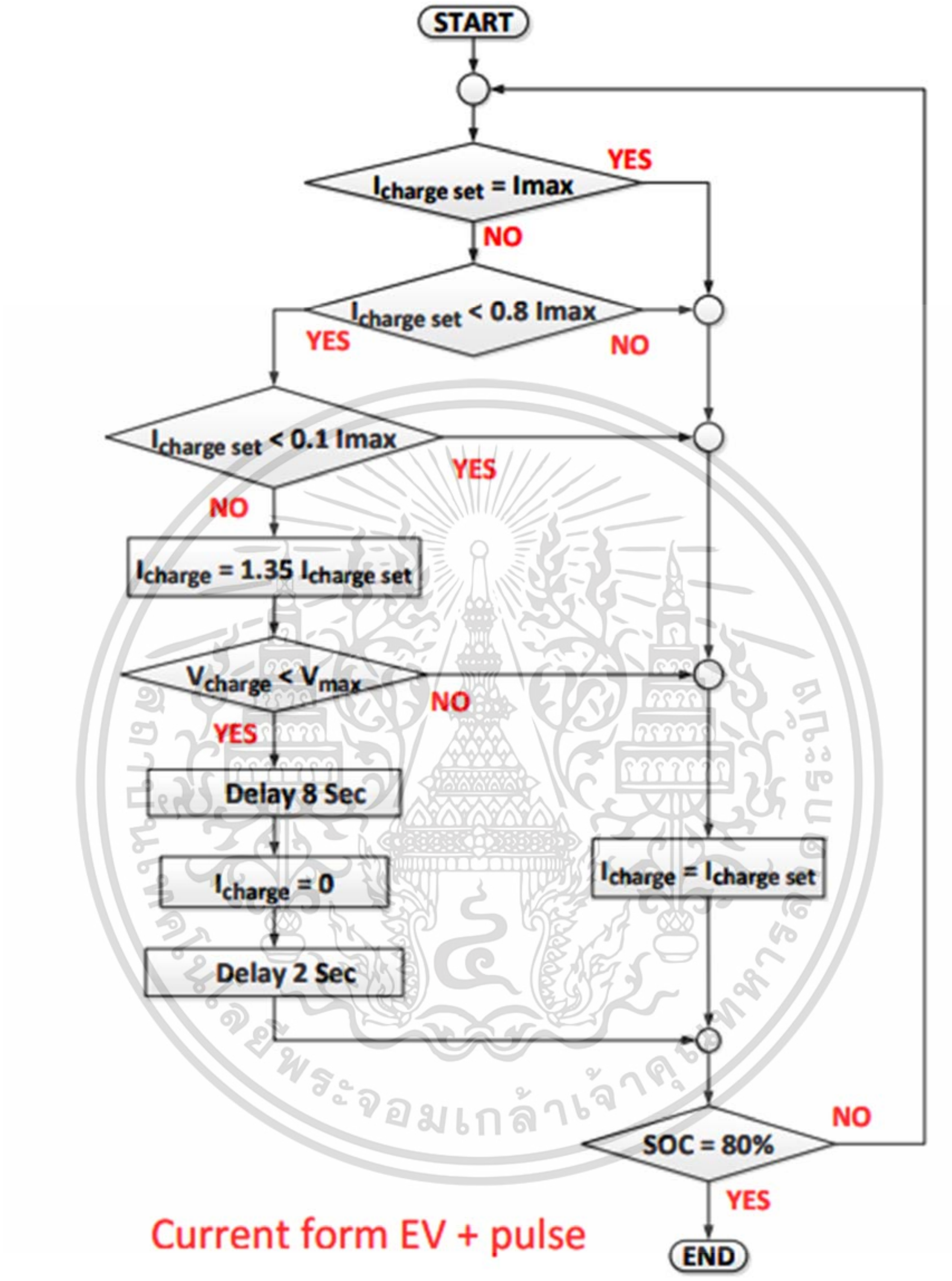
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่

Design Specification		
System	Type	Single DC fast-charging station
	Environment	Indoor / outdoor
Input	AC Power Connection	3P+PE
	Input voltage range	400 Vac +/- 10%
	Nominal input voltage	400 Vac
	Nominal input current	70 A
	Nominal input power	50 kVA
	Nominal input frequency	50 Hz
Output for Electric Vehicle	Maximum output power	50 kW
	Maximum output current	120 A
	Output voltage	50-500 V
Output for Electric Bike	Maximum output power	900 w
	Maximum output current	15 A
	Output voltage	10- 60 V
General	DC connection standard	CHAdeMO compliant
	DC cable length	3 m.
	DC plug type	JEVS G105
	RFID system	13.56MHz, ISO 14443A

หลักการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่จะใช้หลักการควบคุมอัตราการมอดูเลตด้านบวกและด้านลบซึ่งแสดงดังไดอะแกรมในรูปที่ 3.21 การทำงานเริ่มจากการกำหนดดิวตี้ไซเคิ้ลและความถี่การสวิตชิ่ง หลังจากนั้นเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่จะทำงานอย่างอัตโนมัติโดยพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ถ้าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มากกว่าแรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่กำหนด ตัวควบคุมจะทำการลดอัตราการมอดูเลตด้านบวกลงเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่กำหนดไว้ จะพิจารณาต่อว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่อัดประจุเกินค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าเกินตัวควบคุมจะลดอัตราการมอดูเลตด้านบวกและเพิ่มอัตราการมอดูเลตด้านลบ ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าไม่เกินต้องเพิ่มอัตราการมอดูเลตด้านบวกและลดอัตราการมอดูเลตด้านลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการทดสอบการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ต้นแบบที่รองรับการอัดประจุตามมาตรฐาน CHAdeMO ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ซึ่งประกอบด้วย ผลการทดสอบการสื่อสารมาตรฐาน CHAdeMO ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ และการเปรียบเทียบผลการทำงานระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป

3.5.1 ผลการทดสอบการสื่อสารมาตรฐาน CHAdeMO ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

ระบบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะต้องได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าจากรถยนต์ไฟฟ้าโดยส่งผ่านช่องทางการสื่อสาร เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องอัดประจุอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าให้จ่ายกระแสไฟฟ้าตามที่รถยนต์ไฟฟ้าต้องการ โดยรูปแบบการอัดประจุจะเป็นแบบกระแสไฟฟ้าคงที่และจะลดกระแสไฟฟ้าลงในช่วงที่แบตเตอรี่มีค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความจุแบตเตอรี (%SOC) สูงขึ้น ทั้งนี้รถยนต์ไฟฟ้าจะทำการคำนวนค่ากระแสที่ต้องการจากค่าแรงดันไฟฟ้า ค่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่ ค่า %SOC และค่าอื่น ๆ เพื่อควบคุมการอัดประจุให้มีความเหมาะสมกับแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น และมีการตัดการทำงานในทันทีที่เกิดความผิดพลาดหรือได้รับสัญญาณผิดปกติจากการสื่อสาร สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปจะแนะนำให้ใช้บริการเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว (Quick Charger) ในย่านค่า %SOC ไม่เกิน 80% เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนการทำงานและผลการทดสอบเป็นดังนี้

1) เริ่มต้นด้วยการกดปุ่มสตาร์ทเพื่ออัดประจุ สัญญาณ Charge Sequence Signal 1 จะถูกส่งจากเครื่องอัดประจุไปยังรถยนต์ไฟฟ้า เมื่อรถยนต์ไฟฟ้าได้รับสัญญาณ Charge Sequence Signal 1 รถยนต์ไฟฟ้าจะเริ่มต้นส่งสัญญาณ CAN ตอบกับมาที่เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

2) มีการสั่งปิดคอนแทครีเลย์ภายในตัวรถยนต์ไฟฟ้า และจะส่งสัญญาณกลับมาในบิตที่เป็นการเชื่อมต่อโปรโตคอลระหว่างตัวรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (Vehicle Charge Permission) แสดงดังรูปที่ 3.22 พร้อมทั้งล๊อคหัวอัดประจุ

3) เมื่อรถยนต์ไฟฟ้าได้สื่อสารข้อมูลกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าผ่านการสื่อสารมาตรฐาน CHAdeMO และตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์และการเข้ากันได้ระหว่างเครื่องอัดประจุกับรถยนต์ไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว รถยนต์ไฟฟ้าจะ Enabled บิตที่เรียกว่า Vehicle Charging Enabled โดยจะส่งสัญญาณกลับไปที่เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าและจะรอสัญญาณ Charge Sequence Signal 2 ที่มาจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อรอการตรวจสอบสถานะความพร้อมฝั่งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เมื่อรถยนต์ไฟฟ้ามีสถานะพร้อมที่จะอัดประจุแบตเตอรี่ รถยนต์ไฟฟ้าจะเซตบิต Vehicle Status และส่งสถานะไปแจ้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเพื่อเริ่มกระบวนการอัดประจุ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะเริ่มทำงาน และจะส่งข้อมูลเป็นสถานะของเครื่องออกไปแจ้ง โดยจะสั่งจากบิตของ Charging Stop Control และ Charger Status เพื่อบ่งบอกว่าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ได้ทันที

5) การหยุดทำงานขณะอัดประจุ มี 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้ามีการสั่งตัดจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ บิต Charging Stop Control จะหยุดทำงานก่อน แล้วบิต Vehicle Charging Enabled จึงจะหยุดตาม

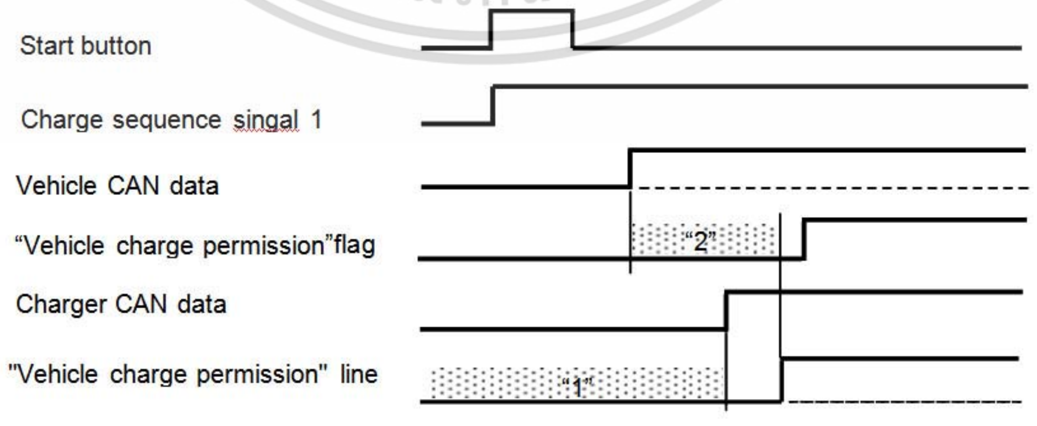
กรณีที่ 2 ถ้ามีการสั่งตัดจากรถยนต์ไฟฟ้าในกรณีที่แบตเตอรี่เต็มหรือรถยนต์ไฟฟ้ามีปัญหา บิต Vehicle Charging Enabled จะหยุดทำงานก่อน แล้วบิต Charging Stop Control จึงจะหยุดตาม เพื่อเป็นการสั่งตัดตัวเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

6. หลังจากบิตของ Charging Stop Control และ Vehicle Charging Enabled ตัดการทำงานแล้ว จึงจะตัดการเชื่อมต่อที่ตัว Contactor ภายในรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายของหน้าคอนแทคจะต้องรอกระแสไฟฟ้าให้ต่ำกว่า 5 A และจะส่งบิต Vehicle Charge Permission กลับมาที่เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

7. เมื่อกระแสไฟฟ้าหยุดไหล เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะสั่งปลดล๊อคหัวอัดประจุทันที

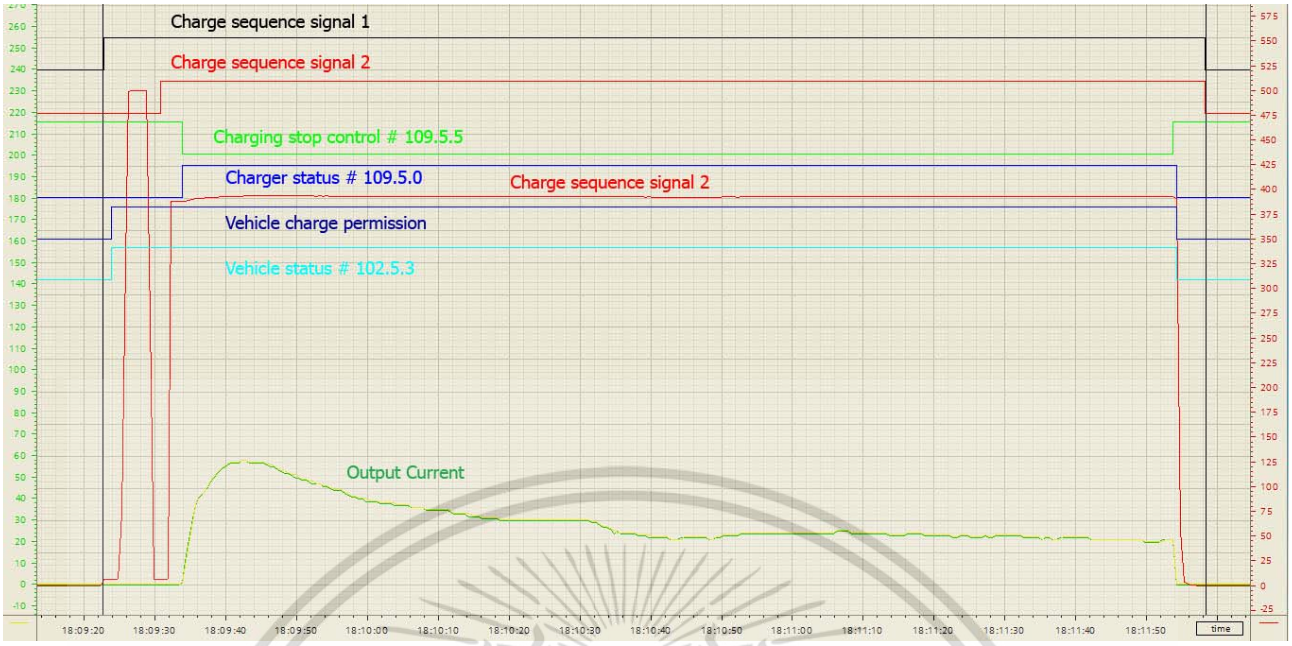
8. เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะสั่งหยุดการทำงานโดยส่งบิตที่เรียกว่า Charger Status ไปที่รถยนต์ไฟฟ้า เช่นเดียวกันกับรถยนต์ไฟฟ้าก็จะหยุดบิตที่เรียกว่า Vehicle Status

9. เมื่อสถานะรถยนต์ไฟฟ้าและเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าหยุดทำงานแล้ว เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะตัดสัญญาณของ Charge Sequence Signal 2 และ Charge Sequence Signal 1 ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 สัญญาณการการเชื่อมต่อโปรโตคอลระหว่างตัวรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 การทำงานของสัญญาณต่าง ๆ ตามมาตรฐาน CHAdeMO

ซึ่งสัญญาณการสื่อสารต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 3.23 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- **Charge Sequence Signal 1** คือ สัญญาณแรกที่เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าส่งให้รถยนต์ไฟฟ้าโดยจะเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- **Charge Sequence Signal 2** คือ สัญญาณยืนยันอีกครั้งที่เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าส่งให้รถยนต์ไฟฟ้า หลังจากที่รถยนต์ไฟฟ้ามีการเชื่อมต่อกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้แล้ว
- **Charging Stop Control** คือ การสื่อสารที่บอกสถานะของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (ทำงาน/หยุดทำงาน)
- **Charger status** คือ การสื่อสารที่บอกสถานะของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (พร้อม/ไม่พร้อม)
- **Vehicle Charge Permission** คือ สัญญาณบ่งบอกสถานะของรีเลย์ภายในตัวรถยนต์ไฟฟ้า
- **Vehicle Charging Enabled** คือ การสื่อสารที่บอกถึงสถานะการเชื่อมต่อการสื่อสาร
- **Vehicle Status** คือ การสื่อสารที่บอกสถานะของรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

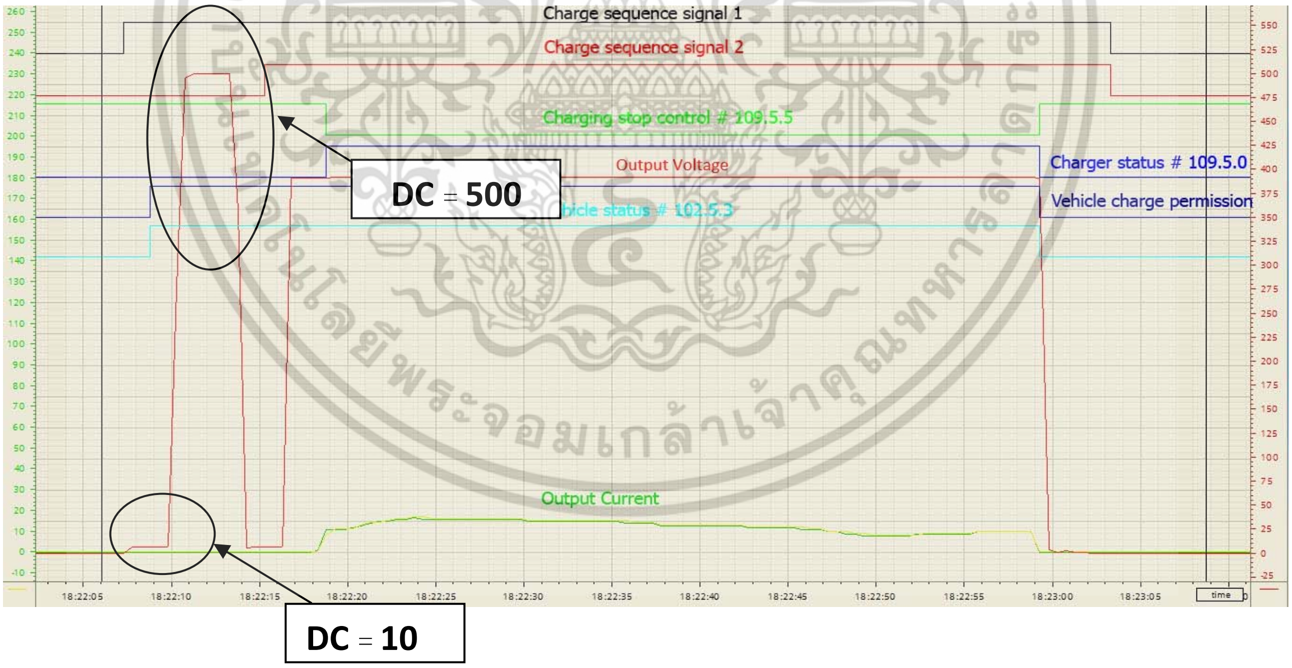
ก่อนการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทุกครั้งจะต้องมีการทดสอบระบบการอัดประจุ ขั้นตอนแรกจะต้องมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 10 V ก่อนจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 500 V แสดงดังรูปที่ 3.24 เพื่อตรวจสอบหน้าคอนแทคของรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งต้องเปิดอยู่ เพราะถ้าหน้าคอนแทคปิดอยู่อาจจะส่งผลต่อแบตเตอรี่ได้

- ถ้าหน้าคอนแทคเปิดอยู่แรงดันไฟฟ้าจะไม่เกิน 10 V เข้าสู่ขั้นตอนต่อไป
- ถ้าหน้าคอนแทคปิดอยู่แรงดันไฟฟ้าจะเกิน 10 V เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะสั่งตัดการทำงานทันที

เมื่อทดสอบตำแหน่งของหน้าคอนแทคเรียบร้อยแล้ว จะมีการทดสอบความเป็นฉนวนของวงจร โดยเครื่องอัดประจุจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 500 V เข้าไปในรถยนต์ไฟฟ้าทุกครั้งก่อนเริ่มทำการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

- Ground Fault และ Short Circuit ภายในเครื่องอัดประจุหรือสายไฟ
- หน้าคอนแทคของรถยนต์ไฟฟ้าจะต้องปิดหลังจากมีการทดสอบ

ความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบจะต้องมีค่ามากกว่า 100 kΩ เพื่อป้องกันการ Short Circuit ภายในวงจร และถ้ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า 100 kΩ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะไม่ทำการอัดประจุแบตเตอรี่



รูปที่ 3.24 การทดสอบฉนวนก่อนการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ผลการทดสอบการอัดประจุของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบ

ในทางปฏิบัติการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วจะอยู่ในช่วงค่า %SOC ของแบตเตอรี่ที่ 20% - 80% เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากไม่ควรใช้งานแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจนมีค่า %SOC ของแบตเตอรี่ต่ำกว่า 20% หรือไม่ควรใช้งานพลังงานของแบตเตอรี่จนค่า DOD (Depth Of Discharge) มากกว่า 80% สำหรับในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า จะทำการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจนค่า %SOC ของแบตเตอรี่เท่ากับ 80% เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงจนเกินไป ซึ่งการใช้งานแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสูงมีผลอย่างมากต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้น การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วจึงทำเฉพาะในช่วงค่า %SOC ของแบตเตอรี่ที่ 20% - 80% เท่านั้น

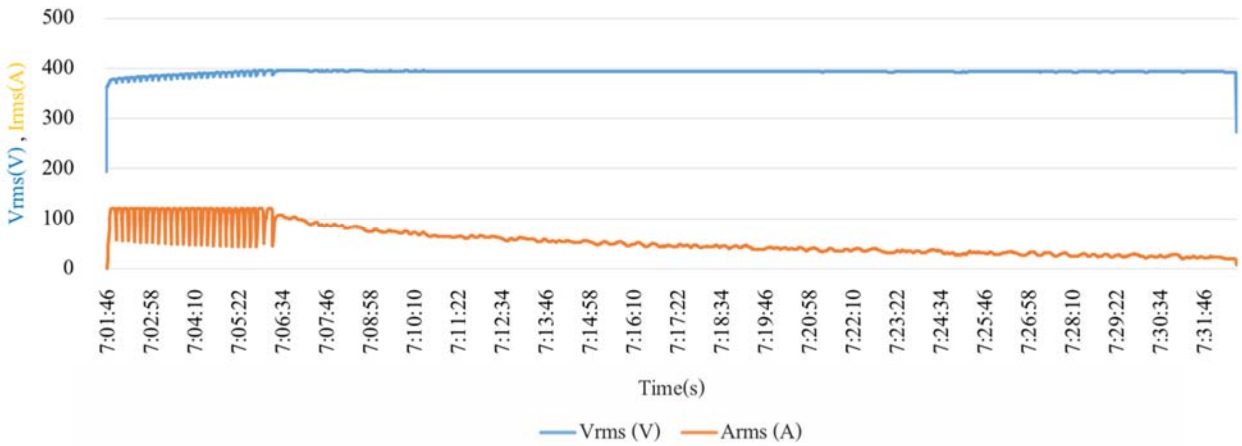
สำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าในช่วงแรก ถ้าเป็นการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วโดยใช้เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ทั่วไปขนาด 50 kW จะใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 20-30 นาที แต่สำหรับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้เร็วกว่าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป เนื่องจากการใช้เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ตามที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้

การทดสอบการอัดประจุเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบจะทำการทดสอบกับรถยนต์ไฟฟ้าจริงยี่ห้อ Nissan Leaf ที่มีแบตเตอรี่ขนาด 24 kWh โดยเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถทำงานได้ 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่ และโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังนี้

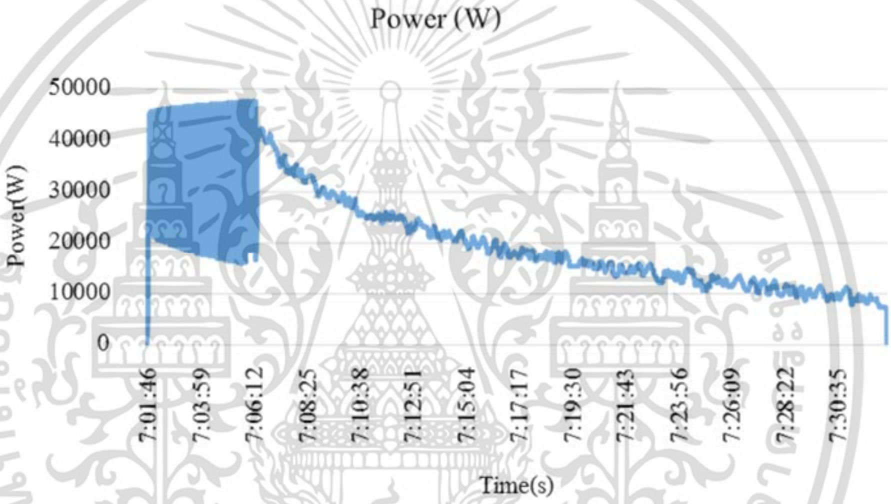
3.5.2.1 ผลการทดสอบโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่

ผลการทดสอบการทำงานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.25 ถึงรูปที่ 3.27 โดยรูปที่ 3.25 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่ รูปที่ 3.26 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจากการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่ และรูปที่ 3.27 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่ใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 30 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 10 kWh

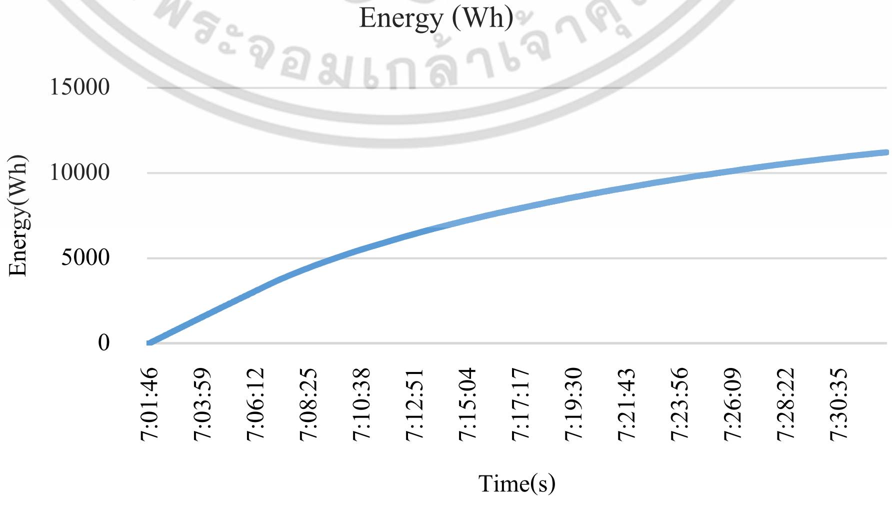
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่



รูปที่ 3.26 กำลังไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่

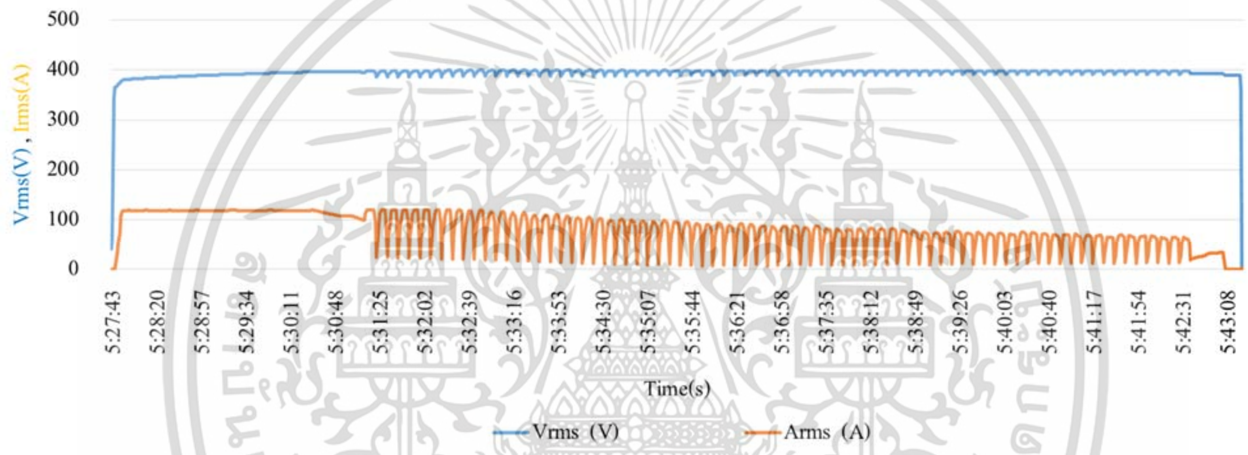


รูปที่ 3.27 พลังงานไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่

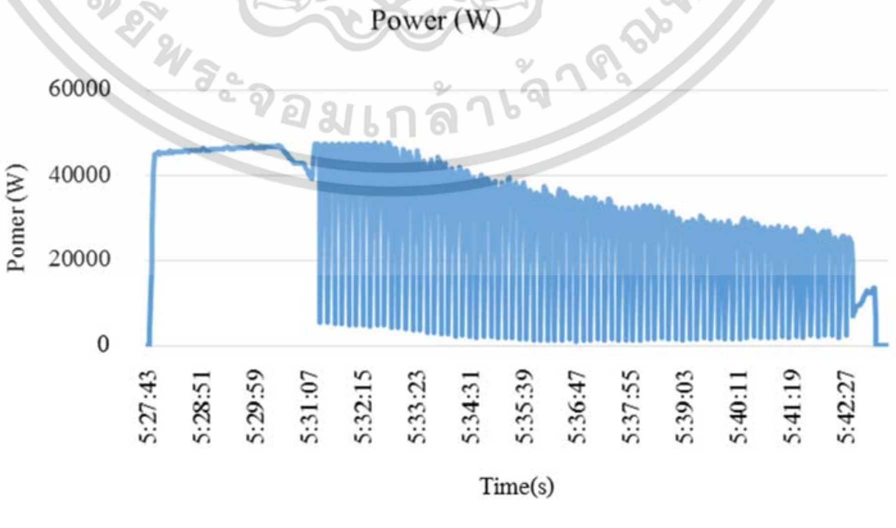
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2.1 ผลการทดสอบโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่

ผลการทดสอบการทำงานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 ถึงรูปที่ 3.30 โดยรูปที่ 3.28 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ รูปที่ 3.26 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจากการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ และรูปที่ 3.27 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ ซึ่งโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 15.8 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 9.3 kWh

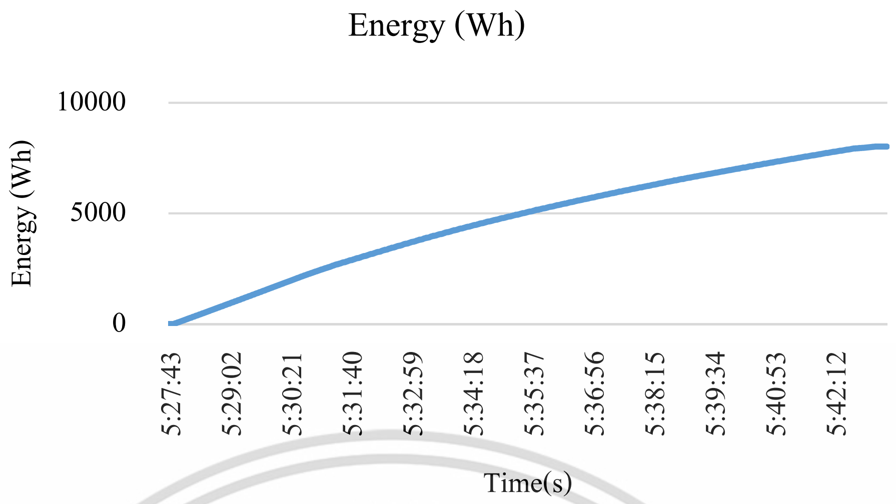


รูปที่ 3.28 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่



รูปที่ 3.29 กำลังไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 พลังงานไฟฟ้าในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่

3.5.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่กับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่กับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปที่รองรับการอัดประจุตามมาตรฐาน CHAdeMO ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน คือ 50 kW สำหรับข้อมูลทางเทคนิคและตัวเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.31 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป

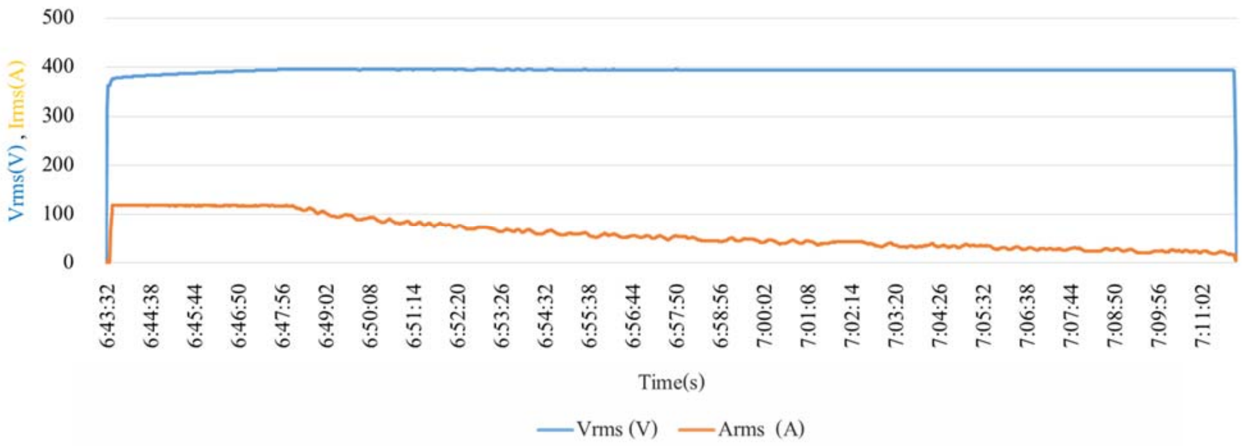
Technical Specification		
	TQVC500M2	TQVC200M1
Charge Output Voltage	50VDC to 500VDC	
Charge Output Current	0 to 125A	0 to 62A
Charge Output Power	50kW	20kW
User Interface	Interface to Vehicle : Serial 1 Ch, Remote Control Port : Serial 1 Ch, LAN I/F (Option)	
Electrical Input Requirements	AC 200V ± 30V Three phase 50/60 Hz	
Operation Temperature	-10 to +40 °C	
Operation Humidity	30 to 90 % Non-condensing	
Model Dimension	1,000mm(W) x 600mm(D) x 1,900mm(H)	600mm(W) x 600mm(D) x 1,600mm(H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

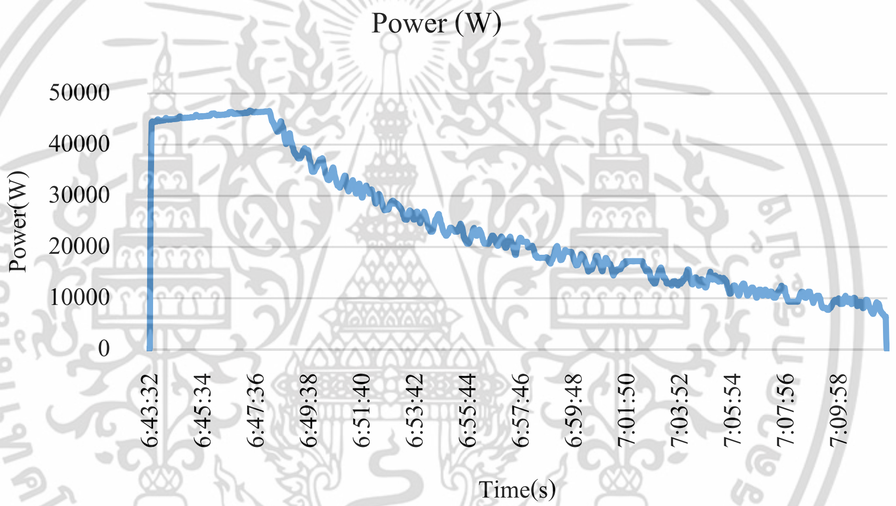
รูปที่ 3.31 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบทั่วไปตามมาตรฐาน CHAdeMO [6]

การอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกจะเป็นการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ การอัดประจุช่วงนี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจนถึงพิกัดการทำงานสูงสุด การอัดประจุแบตเตอรี่จะเปลี่ยนเป็นแบบการอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ ในช่วงการทำงานนี้ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะลดกระแสไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุลงเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ สำหรับการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปในย่าน %SOC ของแบตเตอรี่ 20% - 80% สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.32 ถึงรูปที่ 3.34 โดยรูปที่ 3.32 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป รูปที่ 3.33 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป และรูปที่ 3.34 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งการอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 22 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 10 kWh

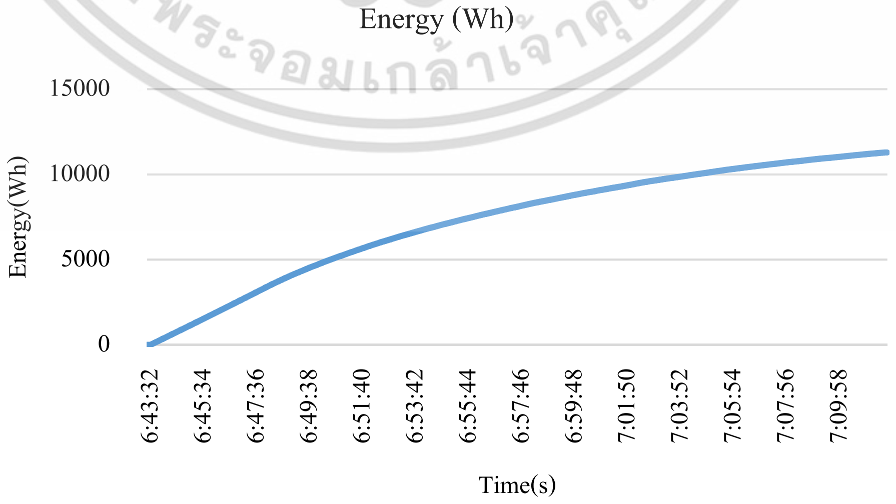
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 3.33 กำลังไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 3.34 พลังงานไฟฟ้าขณะอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป

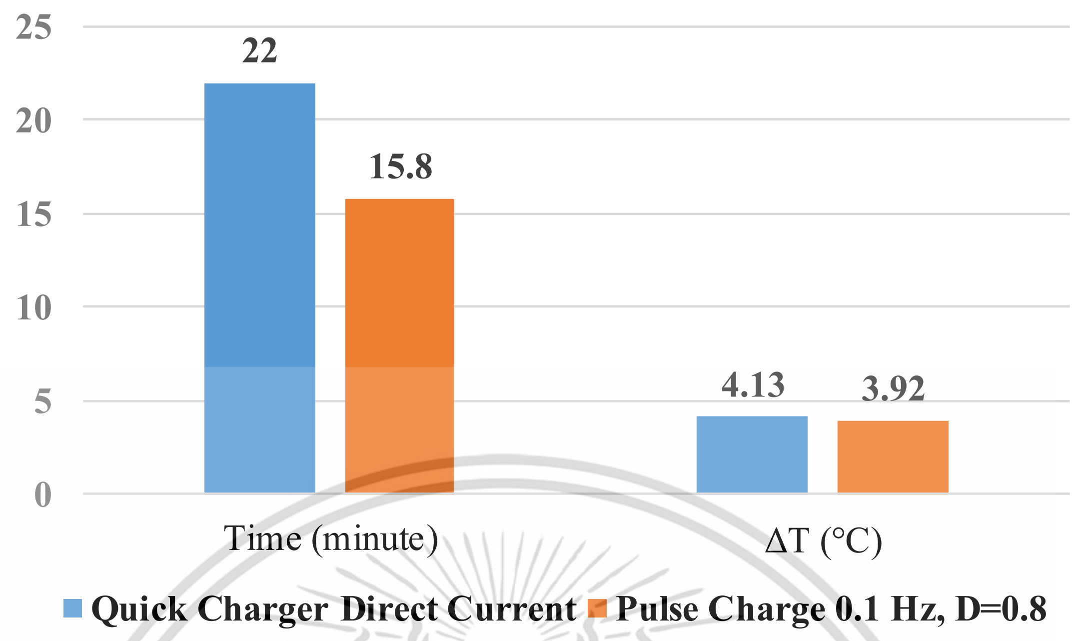
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่สร้างขึ้นและเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป พบว่า โหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่สร้างขึ้นใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อ Nissan Leaf เพียง 15.8 นาที ส่วนการอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 22 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.35 จะเห็นว่า การอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่สามารถลดเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ได้ถึง 6.2 นาที สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากในโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุได้สูงกว่าการอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่ลดลง นอกจากนี้ การสื่อสารระหว่างการอัดประจุระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่สร้างขึ้นยังสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีและไม่เกิดปัญหาใด ๆ ระหว่างการอัดประจุแบตเตอรี่ ถึงแม้วิธีการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่รถยนต์ไฟฟ้าต้องการก็ตาม

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการอัดประจุแบตเตอรี่ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ เนื่องจากภายในระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ลิเธียมของรถยนต์ไฟฟ้าจะมีเซลล์ลิเธียมไอออนและอิเล็กตรอนทำหน้าที่แลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น การทำงานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ปฏิกิริยาภายในเซลล์ของแบตเตอรี่ผิดปกติได้ นอกจากนี้ ภายในรถยนต์ไฟฟ้ายังมีกล่องควบคุมการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าโดยมีตัวตรวจจับอุณหภูมิขณะอัดประจุแบตเตอรี่ หากผลต่างของอุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มทำการอัดประจุแบตเตอรี่กับอุณหภูมิขณะทำการอัดประจุแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าต่างกันเกิน 5 องศาเซลเซียส กล่องควบคุมการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าจะสั่งให้รถยนต์ไฟฟ้าหยุดการอัดประจุแบตเตอรี่ทันทีเพื่อลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ หากอุณหภูมิของแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะปกติจึงจะสามารถเริ่มอัดประจุแบตเตอรี่ใหม่ได้

จากการทดสอบการวัดอุณหภูมิที่แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าขณะทำการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า พบว่า อุณหภูมิจากการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่สร้างขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นจากอุณหภูมิก่อนเริ่มทำการอัดประจุเท่ากับ 3.92 °C และอุณหภูมิจากการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปจะมีค่าสูงขึ้นจากอุณหภูมิก่อนเริ่มทำการอัดประจุเท่ากับ 4.13 °C ซึ่งการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ที่สร้างขึ้นจะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปเท่ากับ 0.21 °C ดังแสดงในรูปที่ 3.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 เปรียบเทียบผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ระหว่างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่กับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป

3.6 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า โดยเริ่มจากการพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการจนเป็นงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากหน่วยงานภายนอก (สนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) สำหรับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วที่พัฒนาขึ้นนี้จะรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน CHAdeMO ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่เหนือกว่าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วทั่วไป คือ สามารถลดเวลาและลดอุณหภูมิในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ องค์ความรู้ที่ได้จากการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่สามารถนำไปต่อยอดงานวิจัยและขยายผลสู่เชิงพาณิชย์ และสามารถสร้างเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายในท้องตลาดได้

สำหรับเนื้อหาในบทถัดไปซึ่งเป็นบทที่ 4 จะนำเสนอเกี่ยวกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วแบบ Multi-Standard ที่รวมมาตรฐาน AC Type 2 มาตรฐาน CHAdeMO และมาตรฐาน CCS ไว้ในเครื่องเดียวกัน โดยใช้องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 2 และองค์ความรู้จากการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ดังที่กล่าวไว้ในบทนี้มาพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์ โดยผลิตในนามสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและส่งมอบให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะมีการนำเสนอในลำดับถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วแบบหลายมาตรฐาน (Multi-Standard) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ที่ได้รับการต่อยอดงานวิจัยจากการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานนี้ ประกอบด้วยมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า 3 มาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐาน AC Type 2 มาตรฐาน CHAdeMO และมาตรฐาน CCS เป้าหมายในการผลิตเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน คือ เพื่อสนับสนุนการศึกษา วิจัยและพัฒนา รวบรวมองค์ความรู้เทคโนโลยีต่าง ๆ ในการพัฒนาประเทศ และลดการผูกขาดการนำเข้าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจากต่างประเทศมาใช้งาน เนื่องจากผู้ผลิตเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าในท้องตลาดจะไม่เปิดฟังก์ชันการสื่อสารหรือฟังก์ชันการใช้งานต่าง ๆ หากเจ้าของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าต้องการใช้งานจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มในราคาที่สูงต่อผู้ผลิตเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาและการบริหารจัดการ โดยจะถูกผูกขาดจากผู้ผลิตเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเท่านั้น นอกจากนี้ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของผู้ผลิตต่าง ๆ ยังมีการออกแบบโครงสร้างสถาปัตยกรรมระบบ และรูปแบบการสื่อสารข้อมูลที่ไม่เหมือนกัน ทำให้เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าไม่สามารถสื่อสารข้อมูลกับศูนย์ควบคุมกลางได้ แต่เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะมีรูปแบบการสื่อสารที่อ้างอิงกับโปรโตคอลกลางมีความยืดหยุ่นในการสื่อสารข้อมูลสูง ง่ายต่อการพัฒนา และเหมาะสำหรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

4.2 การออกแบบสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

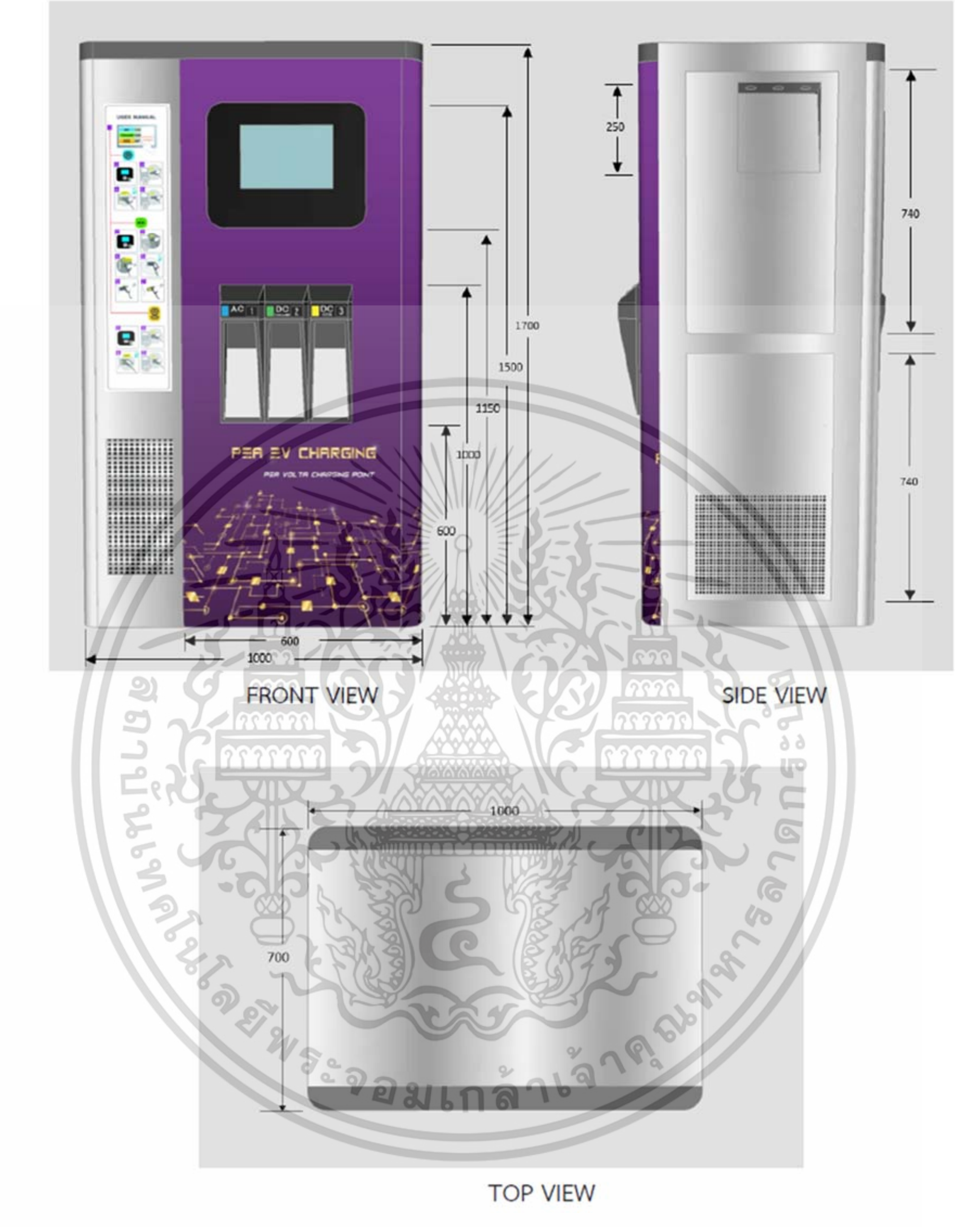
ผลิตภัณฑ์เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานที่สร้างโดยห้องปฏิบัติการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังถูกส่งมอบให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ดังนั้น การออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน จึงเป็นไปตามอัตลักษณ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำหรับการออกแบบโครงสร้าง ลักษณะภายนอก การเตรียมวัสดุชิ้นส่วนต่าง ๆ การขึ้นรูป การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ และตัวเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน ที่สร้างแล้วเสร็จพร้อมติดตั้งใช้งานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 การออกแบบโครงสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

รูปที่ 4.2 รายละเอียดโครงสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ขนาดเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

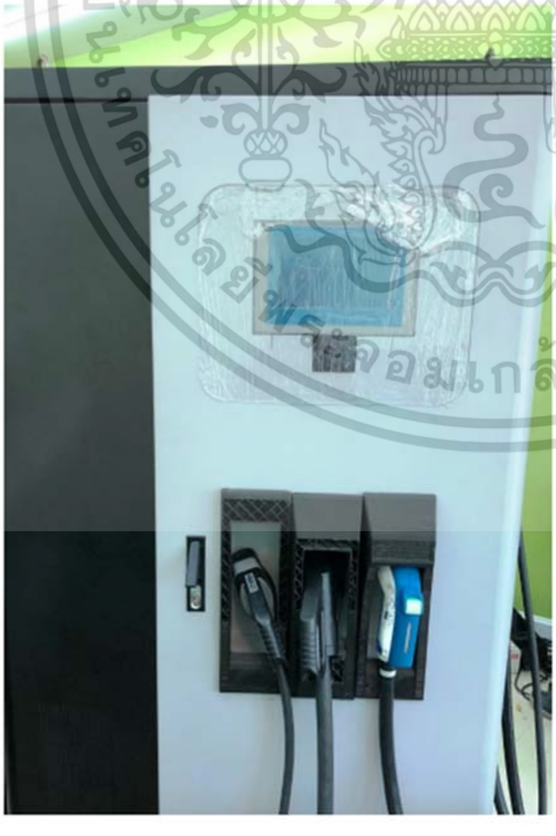
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 การพับเหล็กแต่ละส่วนของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

รูปที่ 4.5 การพับเหล็กหน้าจอของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 การประกอบและขึ้นรูปเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า



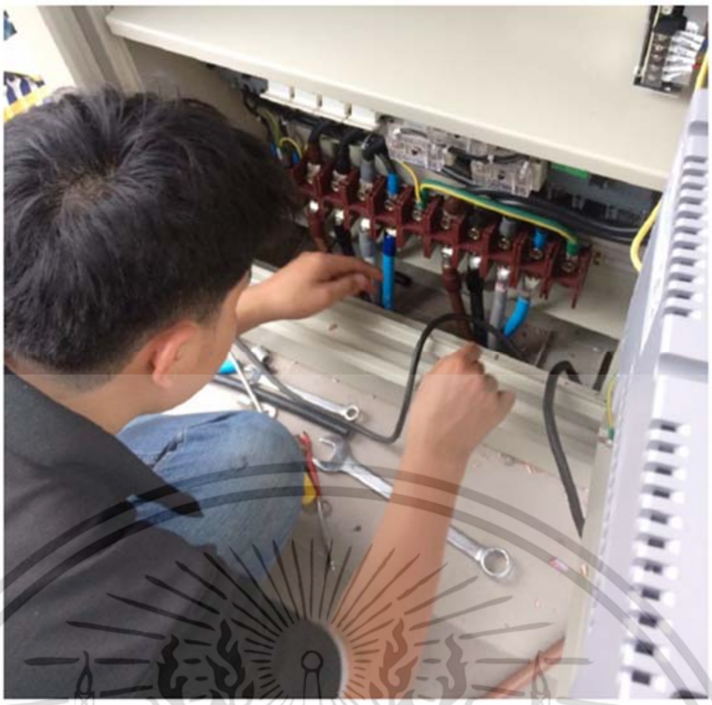
รูปที่ 4.7 การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 การประกอบ Power Module ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

รูปที่ 4.9 การประกอบวงจรควบคุมของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การประกอบวงจรกำลังของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

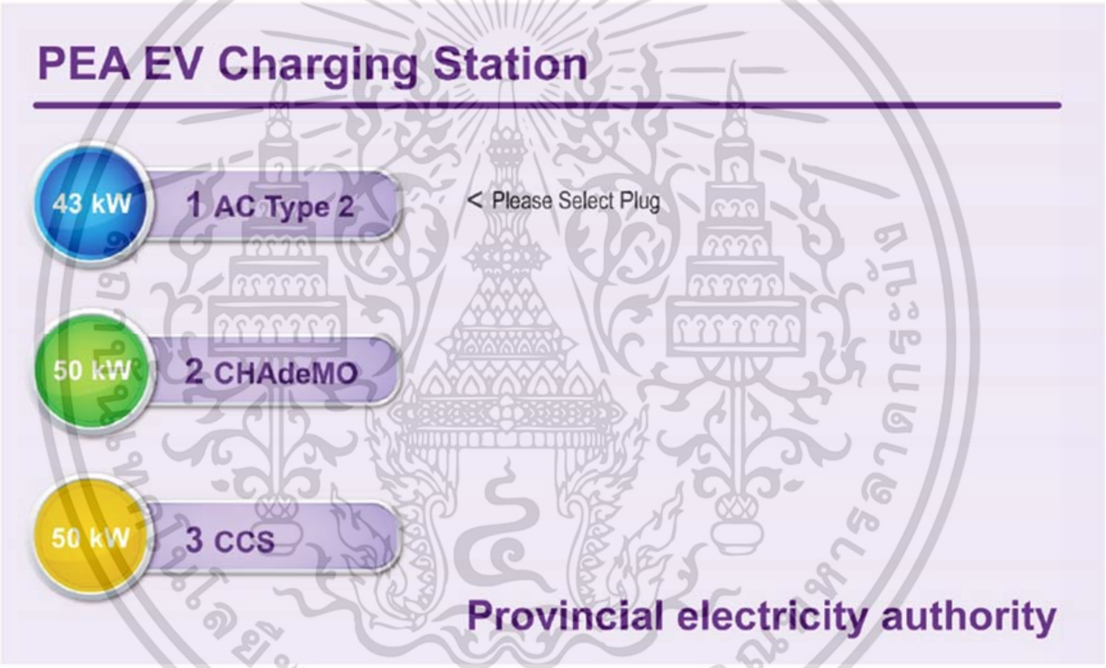
รูปที่ 4.11 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเรียบร้อยพร้อมการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การใช้งานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

การใช้งานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน เริ่มจากเลือกมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่บนหน้าจอ Touch Screen ให้ตรงกับรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อทำการเลือกมาตรฐานการอัดประจุเรียบร้อยแล้ว เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานจะแจ้งสถานะของเครื่องอัดประจุ ณ เวลานั้น โดยแบ่งออกเป็น 4 สถานะ ได้แก่

- Please Plug หมายถึง ให้ผู้ใช้บริการเสียบหัวอัดประจุเข้ากับตัวรถยนต์ไฟฟ้า
- Plug Connect หมายถึง หัวอัดประจุถูกเสียบเข้ากับตัวรถยนต์ไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว
- Fault หมายถึง เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ
- Charging.... หมายถึง กำลังอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าอยู่



รูปที่ 4.12 หน้าจอการเลือกมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่

หลังจากทำการเลือกมาตรฐานการอัดประจุเรียบร้อยแล้วหน้าจอจะแสดงดังรูปที่ 4.13 ให้ทำการเลือกปุ่ม Start ที่มุมด้านล่างขวาของจอ Touch Screen หลังจากนั้นหน้าจอจะมี Pop Up ของรูป RFID CARD และให้นำการ์ดไปสัมผัสยังตัวสแกนบัตรดังแสดงในรูปที่ 4.14 ในขั้นตอนนี้จะต้องสแกนบัตรภายใน 10 วินาที มิเช่นนั้น ระบบจะกลับไปยังหน้าจอหลัก คือ หน้าจอการเลือกมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่

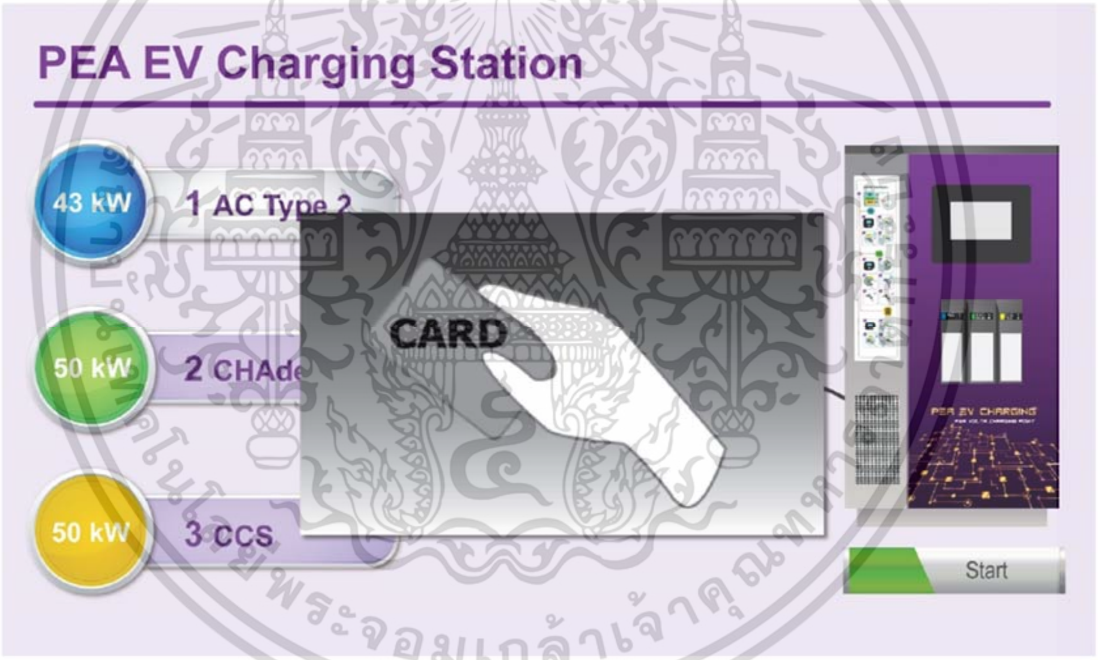
ในกรณีที่บัตรถูกต้องระบบจะทำการเริ่มสั่งการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทันทีพร้อมกับมีเสียง “ติ๊ด” 1 ครั้ง และจะเข้าสู่หน้าจอการอัดประจุดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.17 และขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะ "Charging…." บนหน้าจอ Touch Screen พร้อมทั้งแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง) และเวลาที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยรูปที่ 4.15 เป็นหน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ AC Type 2 รูปที่ 4.16 เป็นหน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CHAdeMO และรูปที่ 4.17 เป็นหน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS ตามลำดับ

แต่ถ้าในกรณีที่บัตรไม่ถูกต้องระบบจะไม่ยอมทำการอัดประจุพร้อมทั้งมีเสียง "ติ๊ด" ดังถี่ ๆ 3 ครั้ง และกลับไปยังหน้าจอหลัก คือ หน้าจอการเลือกมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่อีกครั้ง

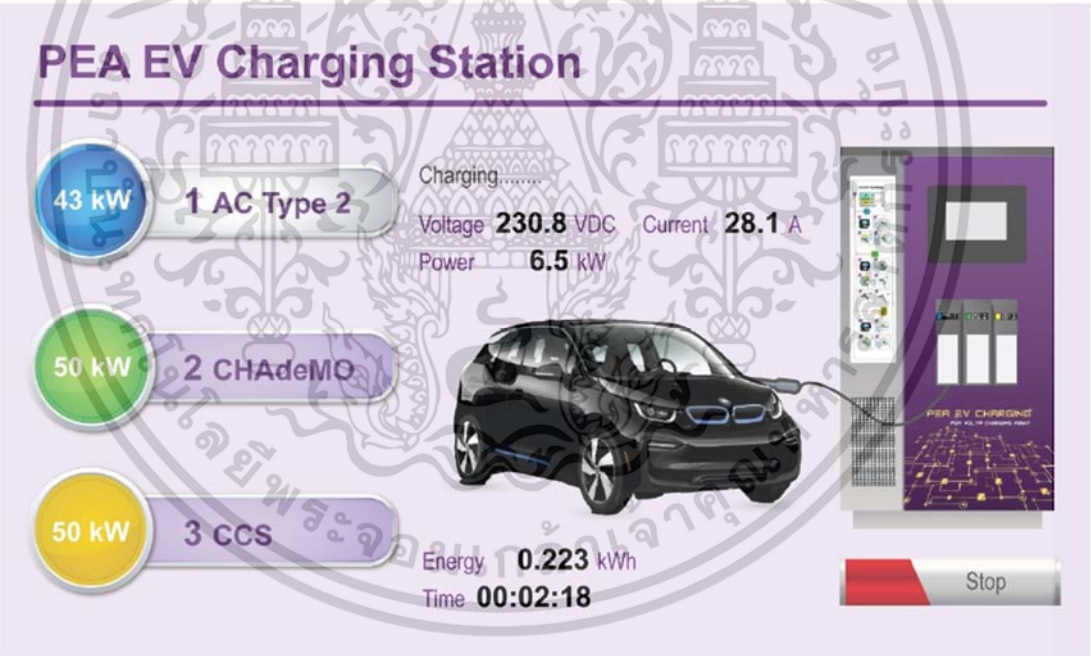
หากต้องการหยุดระบบการอัดประจุแบตเตอรี่ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานให้ทำการสแกนบัตร RFID CARD ณ จุดสแกนบัตร เพียงเท่านี้ระบบการอัดประจุแบตเตอรี่ก็จะหยุดการทำงานทันที



รูปที่ 4.13 หน้าจอแจ้งการสแกน RFID CARD

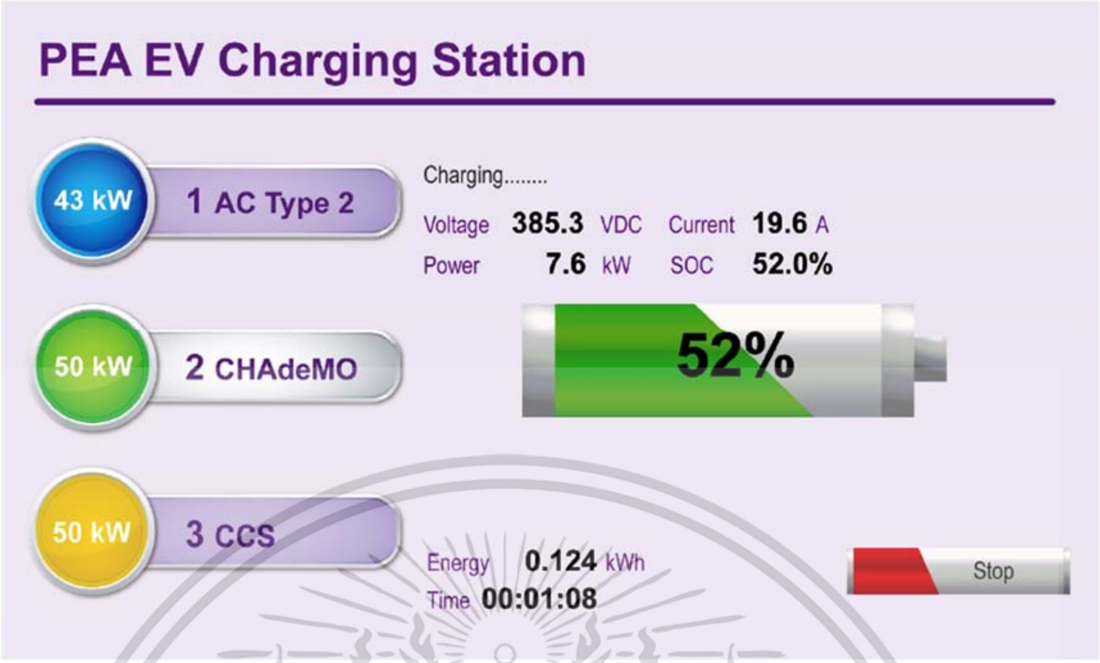
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 จุดสแกน RFID CARD ของเครื่องอัดประจุ

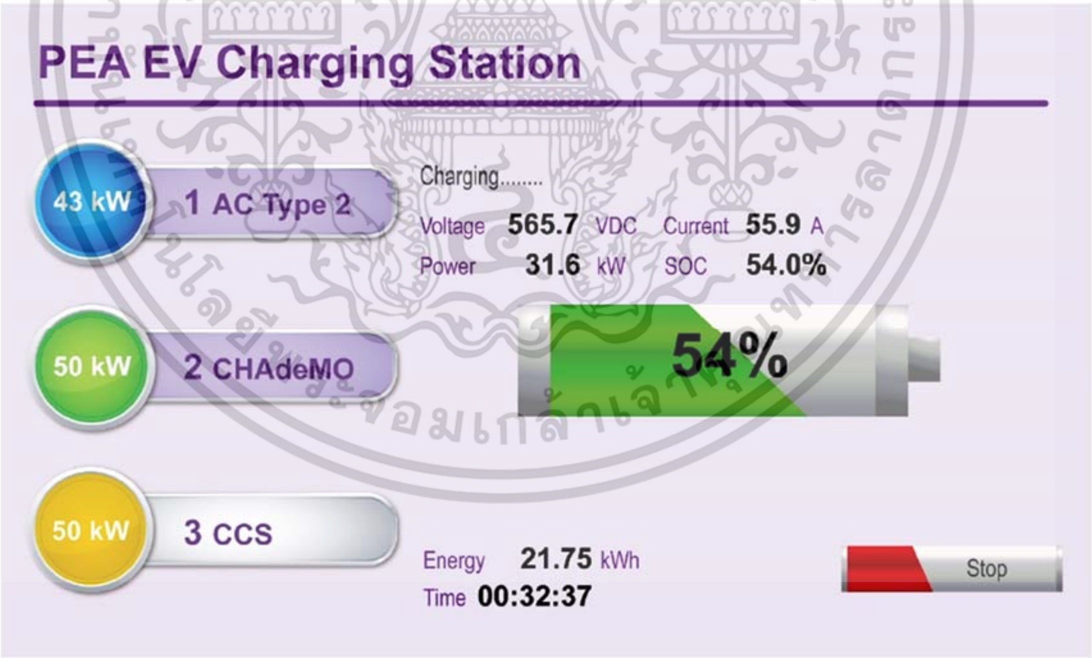


รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ AC Type 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 หน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CHAdeMO



รูปที่ 4.17 หน้าจอแสดงสถานะขณะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ CCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

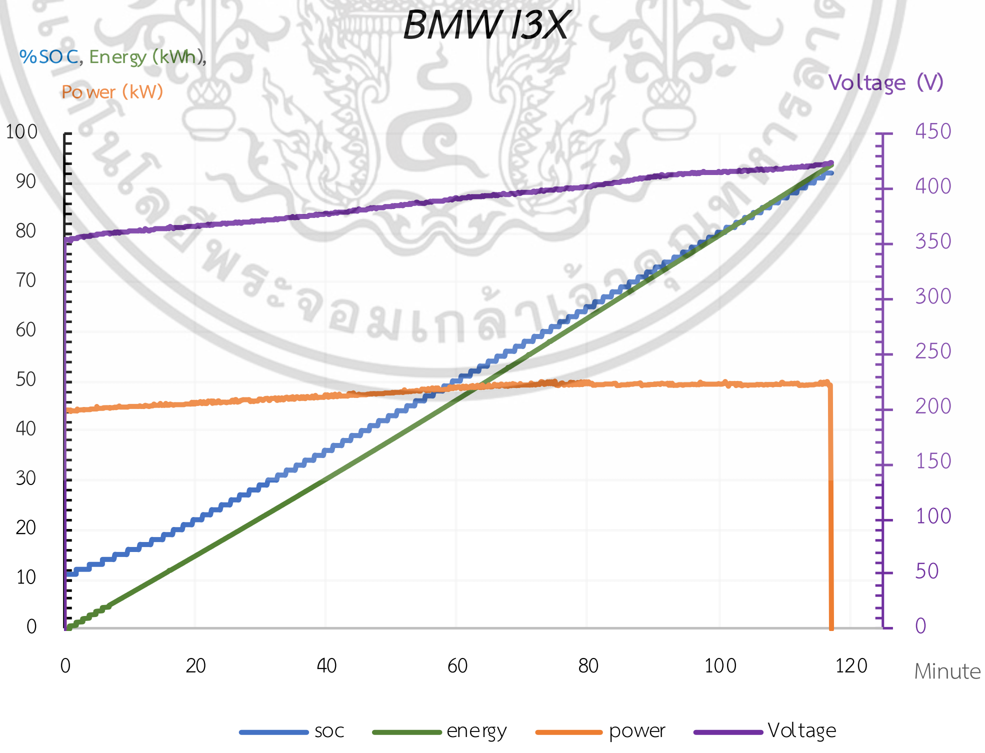
4.4 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

จุดประสงค์หลักอีกประการหนึ่งในการสร้างเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน คือ ต้องการลดปัญหาความแตกต่างของมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่ของบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าบางบริษัทใช้มาตรฐาน AC Type 2 ในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า บางบริษัทใช้มาตรฐาน CHAdeMO ในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า หรือบางบริษัทใช้มาตรฐาน CCS ในการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานที่สร้างขึ้นนี้จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้งานได้กับรถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปที่จำหน่ายในท้องตลาด จึงได้ทำการทดสอบการอัดประจุจริงกับรถยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อต่าง ๆ 14 ยี่ห้อ เป็นจำนวนทั้งหมด 16 รุ่น ได้แก่ BMW-i3X, BMW-iX, Audi-E-Tron, Porhe Taycan, Volvo-XC40, Mini, Tesla-Model3, Tesla-ModelX, KIA-Soul, Hyundai-Kona, Nissan-Leaf2019, MG-ZS, GWM-ORA, Mitsubishi-EV, BYD-E6 และ FOMM-FOMMOne ซึ่งภาพตัวอย่างบรรยากาศการทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 และผลการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั้ง 16 รุ่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.34 โดยรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.30 เป็นผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยมาตรฐาน CCS ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน ส่วนรูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32 เป็นผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยมาตรฐาน CHAdeMO ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน และลำดับสุดท้าย รูปที่ 4.33 และรูป 4.34 32 เป็นผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยมาตรฐาน AC Type 2 ของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

จากการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานที่สร้างขึ้น พบว่า ผลิตภัณฑ์เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี มีประสิทธิภาพ สามารถอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้กับรถยนต์ไฟฟ้าทุกรุ่นทุกยี่ห้อที่มีการจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน สามารถสื่อสารและรับส่งข้อมูลได้ดีทั้งกับตัวรถยนต์ไฟฟ้าและศูนย์ควบคุมกลางของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ และมีความยืนหยุ่นสูงในการพัฒนาและบริหารจัดการ

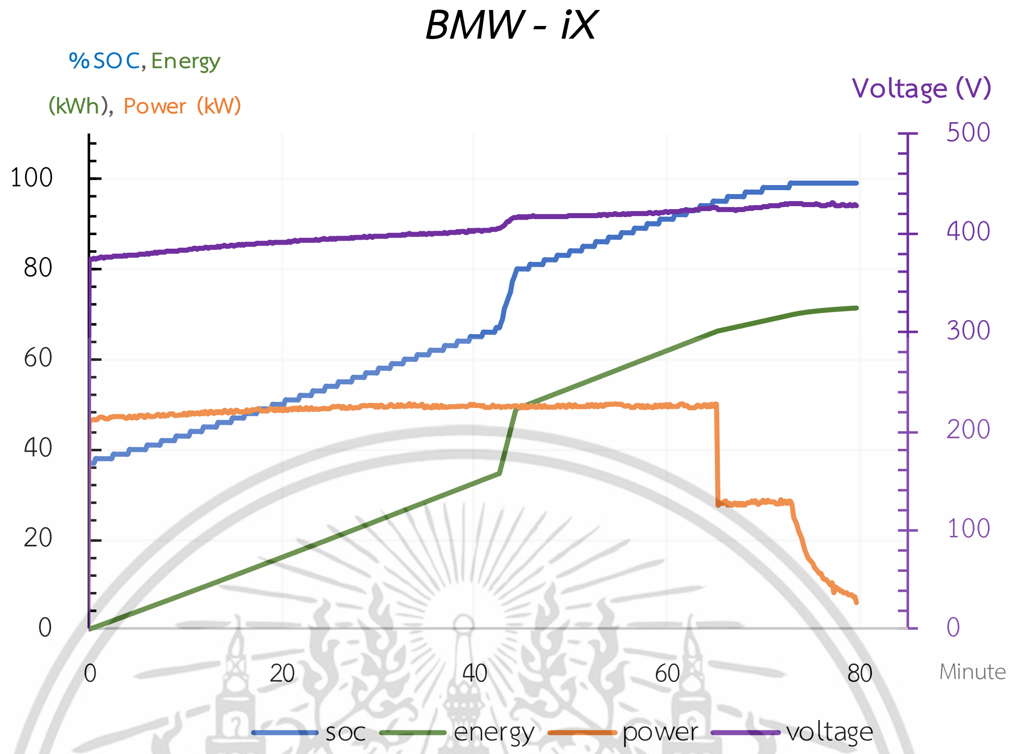
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน

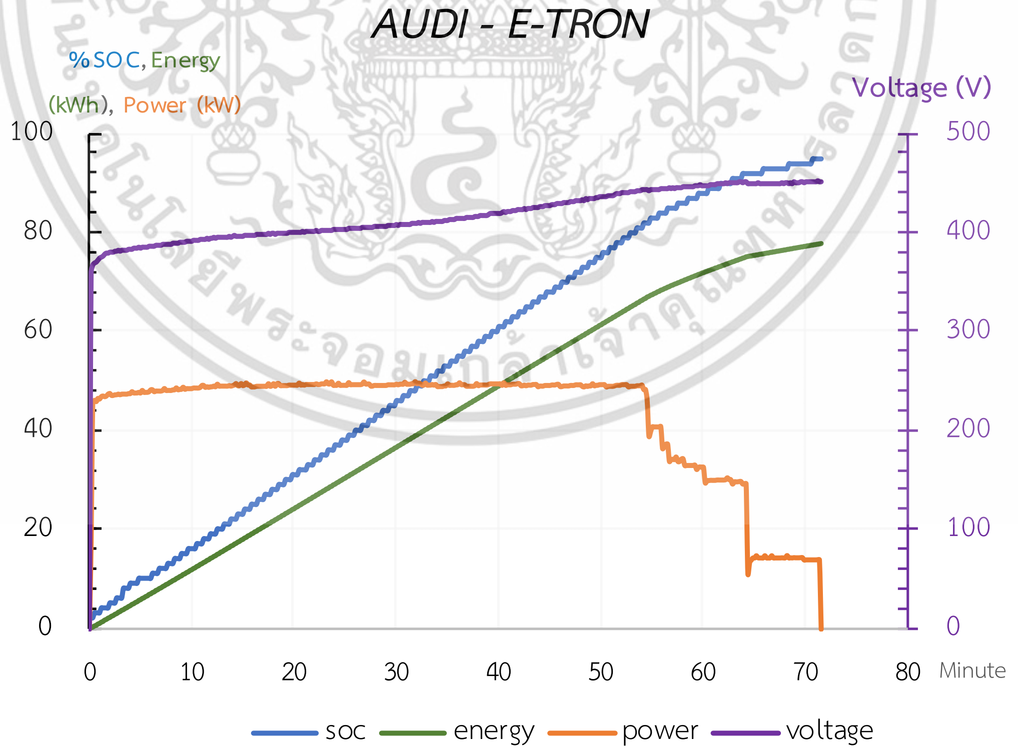


รูปที่ 4.19 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า BMW-i3X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

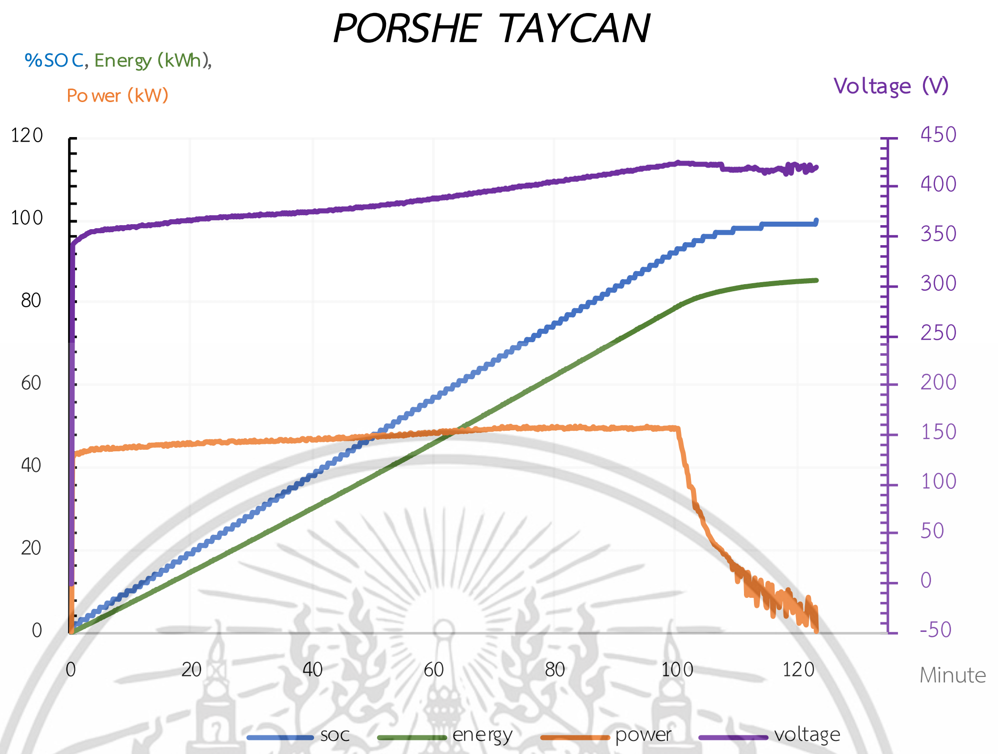


รูปที่ 4.20 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า BMW-iX

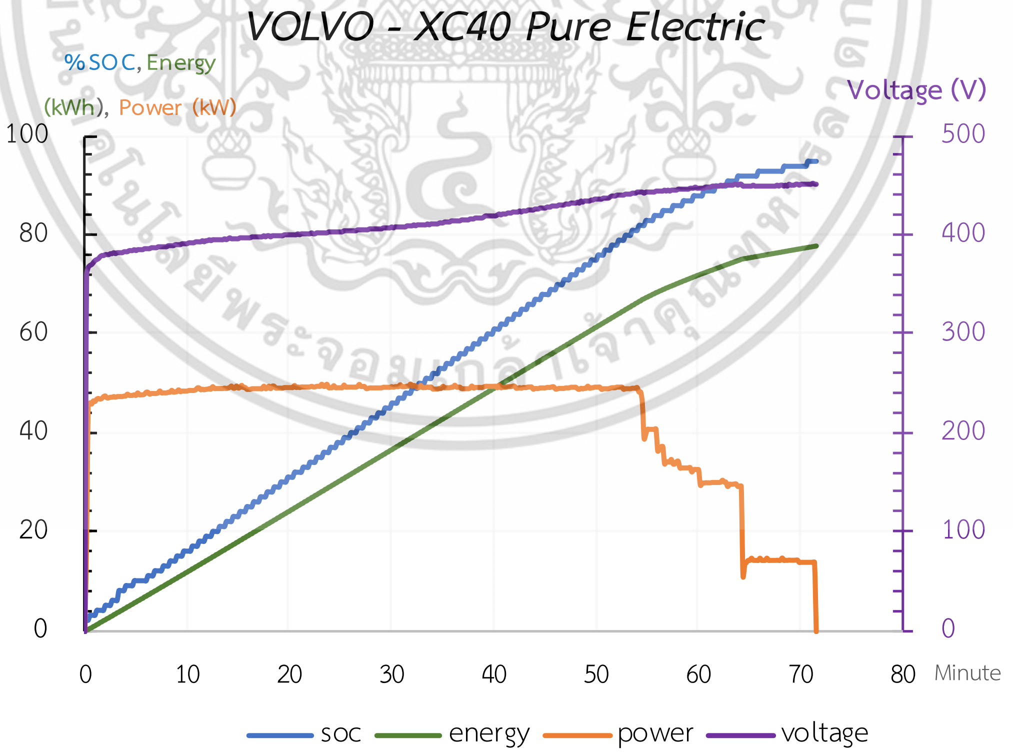


รูปที่ 4.21 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Audi-E-Tron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

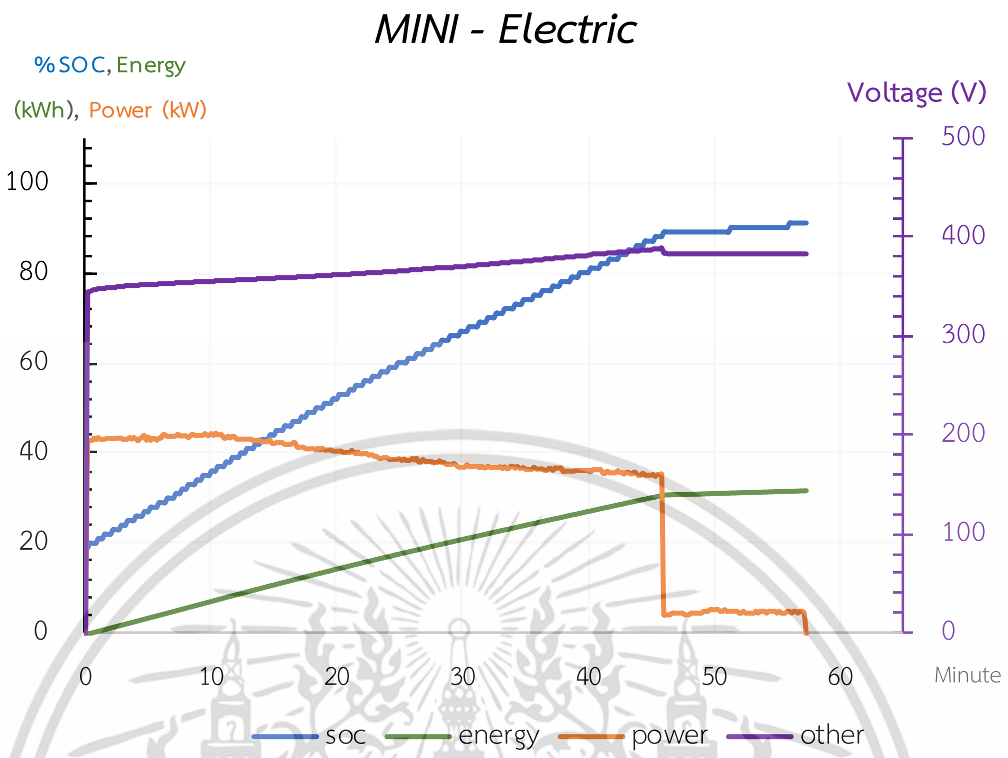


รูปที่ 4.22 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Porhe Taycan

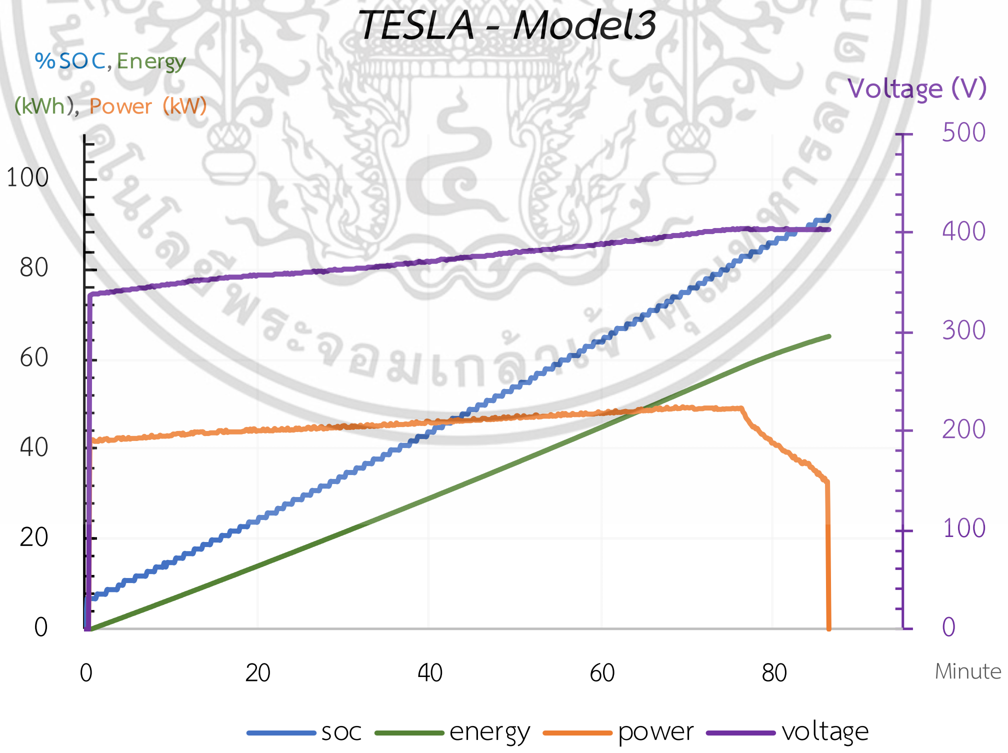


รูปที่ 4.23 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Volvo-XC40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

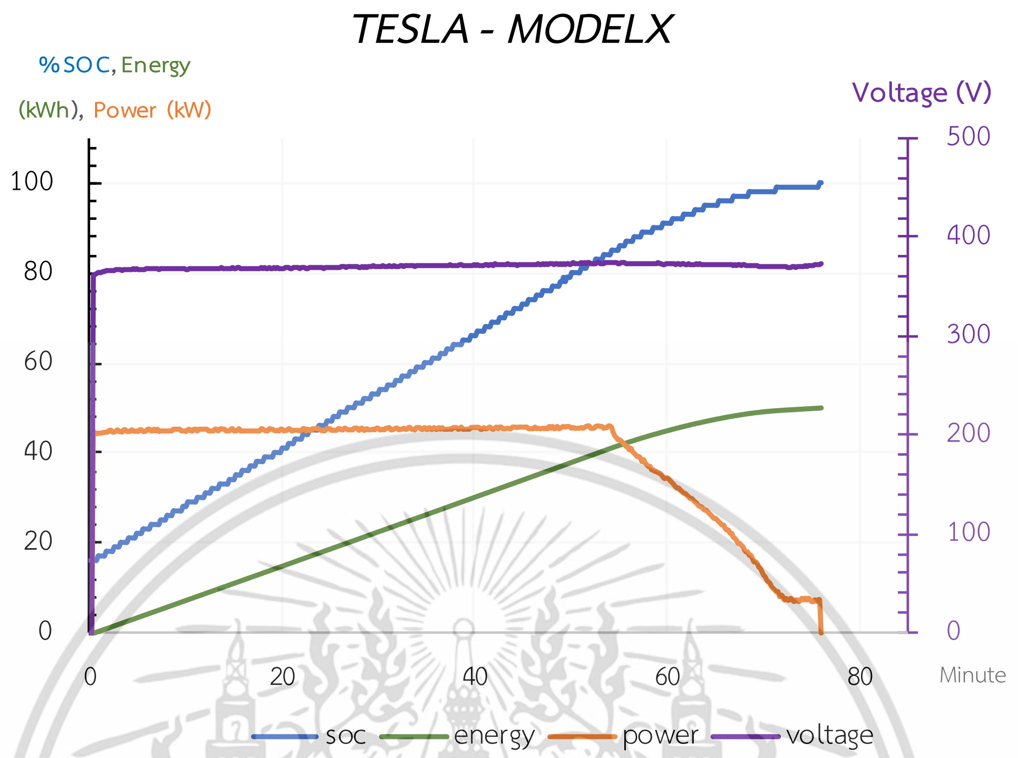


รูปที่ 4.24 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Mini

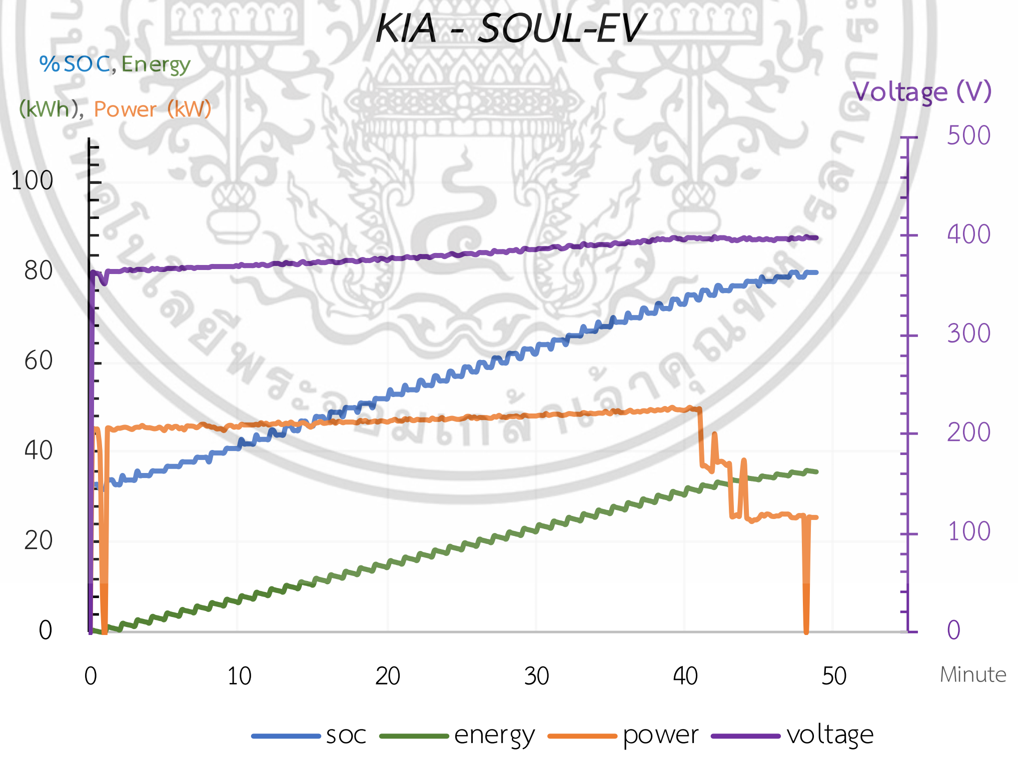


รูปที่ 4.25 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Tesla-Model3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

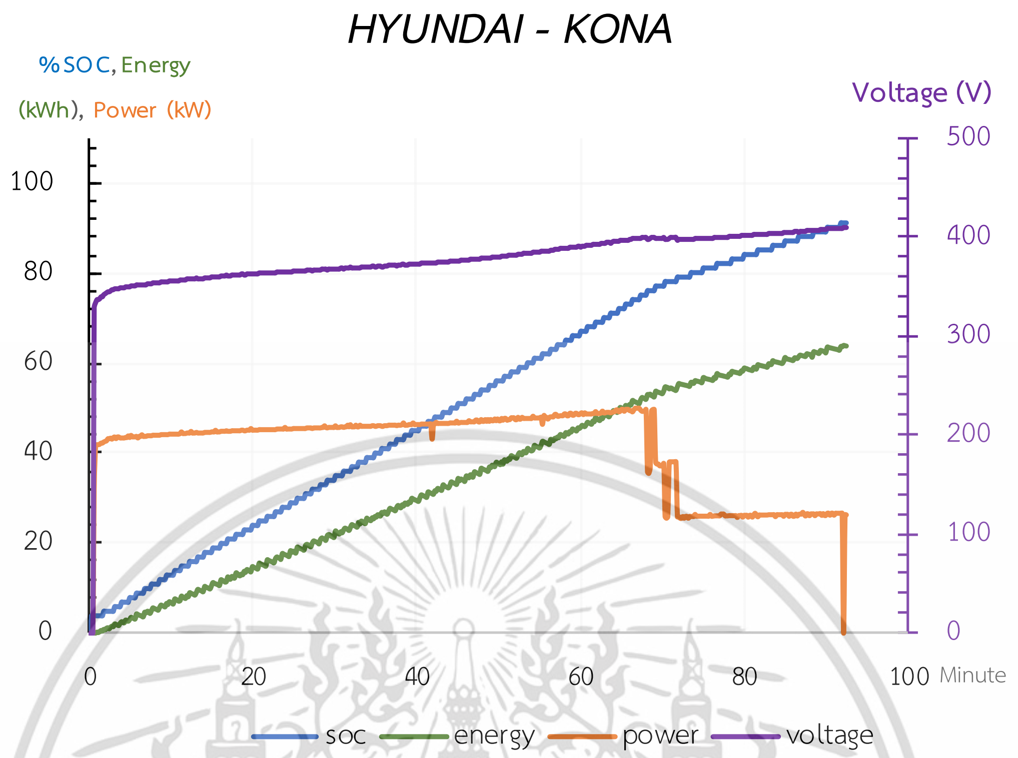


รูปที่ 4.26 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Tesla-ModelX

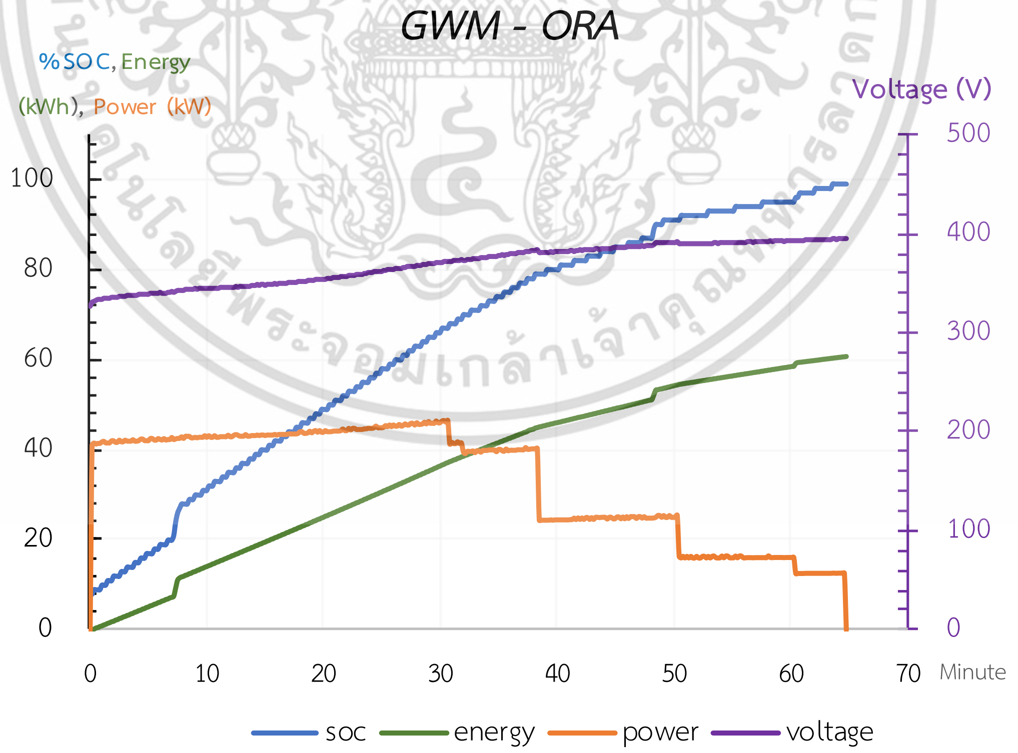


รูปที่ 4.27 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า KIA-Soul

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

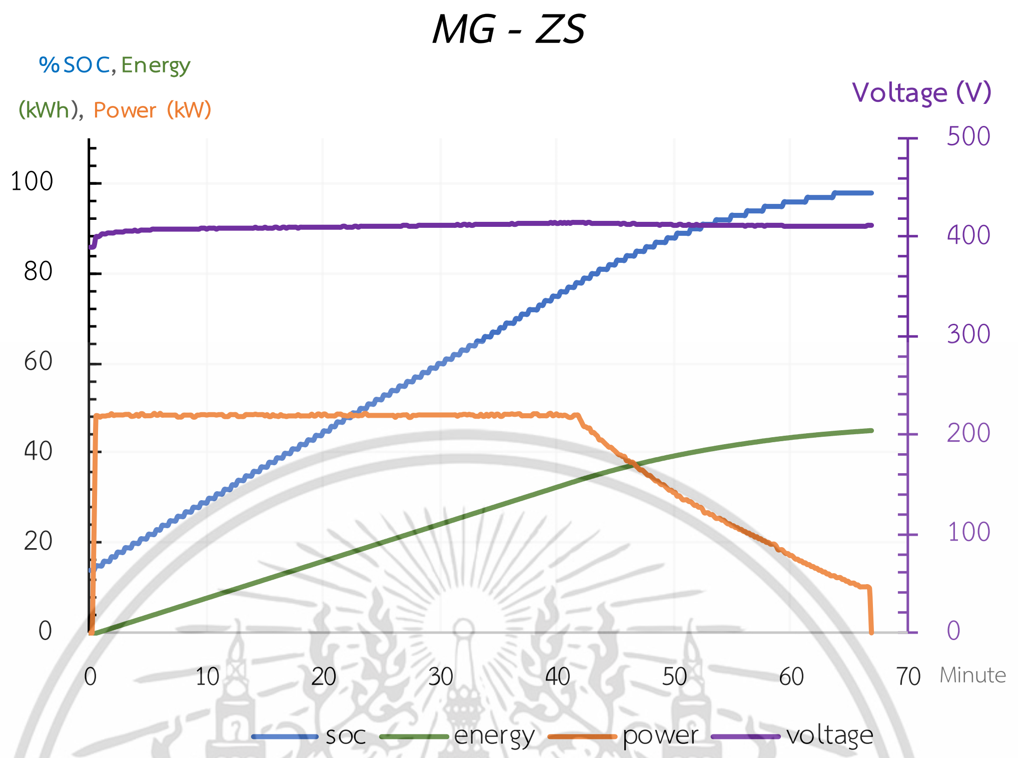


รูปที่ 4.28 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Hyundai-Kona

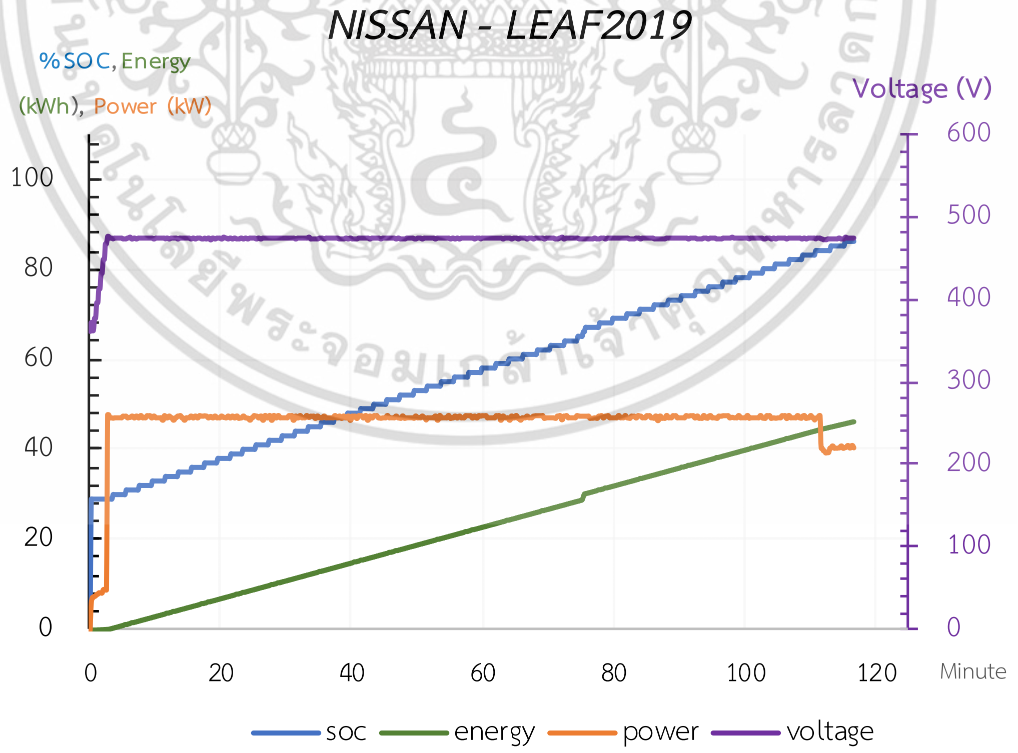


รูปที่ 4.29 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า GWM-ORA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

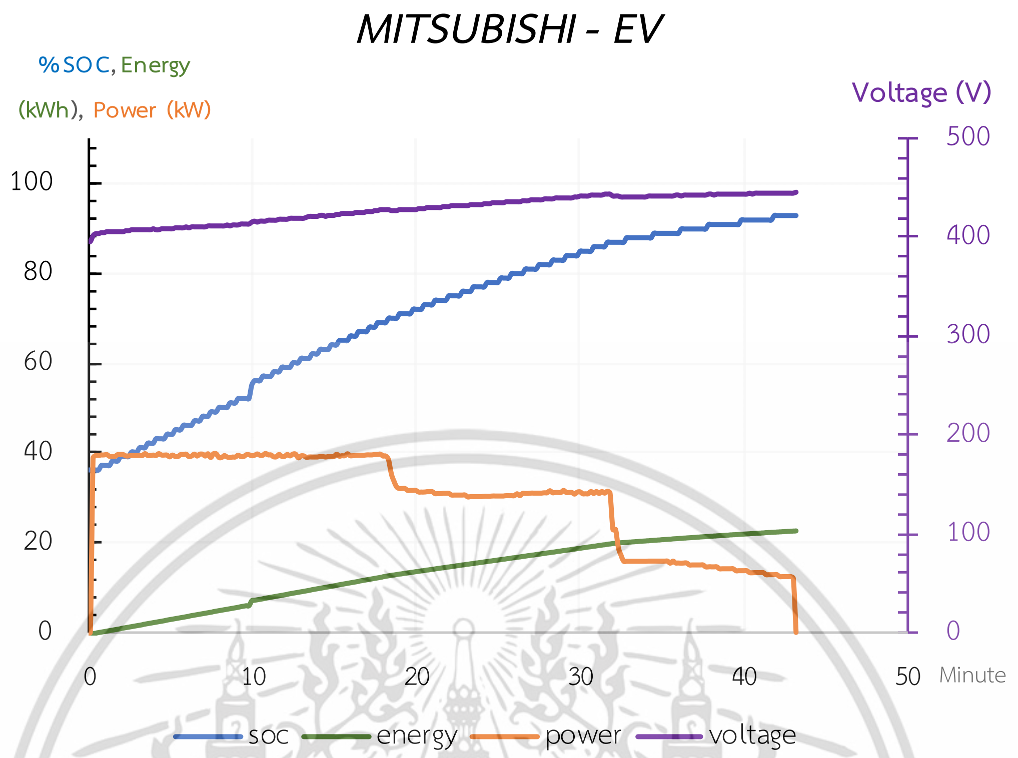


รูปที่ 4.30 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า MG-ZS

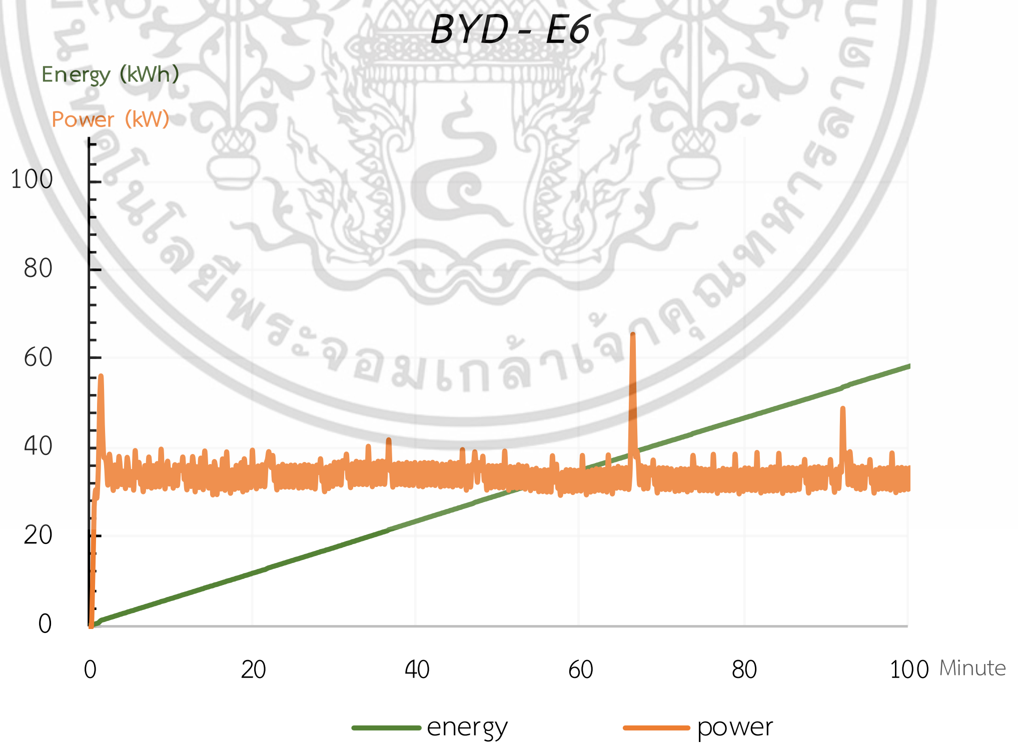


รูปที่ 4.31 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Nissan-Leaf2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

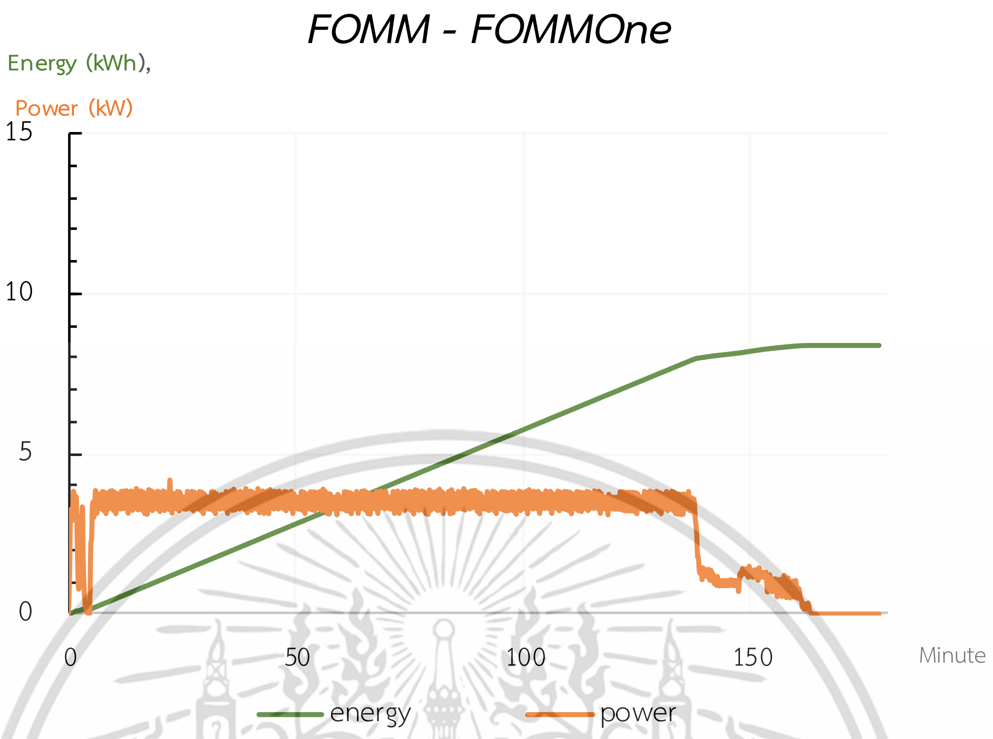


รูปที่ 4.32 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า Mitsubishi-EV



รูปที่ 4.33 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า BYD-E6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 การทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบหลายมาตรฐานกับรถยนต์ไฟฟ้า FOMM-FOMMOne

4.5 บทสรุป

เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐาน นับว่าเป็นอีกหนึ่งความสำเร็จของการต่อยอดงานวิจัยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่เชิงพาณิชย์ ซึ่งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถอัดประจุได้กับรถยนต์ไฟฟ้าทุกรุ่นทุกยี่ห้อที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แม้ว่า เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหลายมาตรฐานที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นนี้รวมทั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะสามารถใช้งานได้ดีในปัจจุบัน แต่จากแนวโน้มการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าย่อมส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นฟังก์ชันการใช้งานในอนาคตของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าอาจไม่ใช่แค่การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่ยังต้องสามารถรองรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้าด้วย เช่น การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากรถยนต์ไฟฟ้าคืนสู่ระบบไฟฟ้า (V2G) หรือสามารถกำหนดค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรถยนต์ไฟฟ้าขณะอัดประจุเพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการใช้พลังงานไฟฟ้าและไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของโหลดอื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

สำหรับเนื้อหาที่จะนำเสนอในลำดับถัดไปจะเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด ซึ่งเป็นการศึกษาการจำลองการทำงานร่วมกันของโรงต้นกำลังไฟฟ้า ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ สถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า โหลดต่าง ๆ ในระบบไมโครกริด และแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ซึ่งได้แก่ พลังงานลม และพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์ โดยทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบไมโครกริดเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไมโครกริด ไม่ว่าจะเป็นความไม่แน่นอนของพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงของโหลดและสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เพื่อรักษาเสถียรภาพทางไฟฟ้าของระบบไมโครกริด และช่วยให้ระบบไมโครกริดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

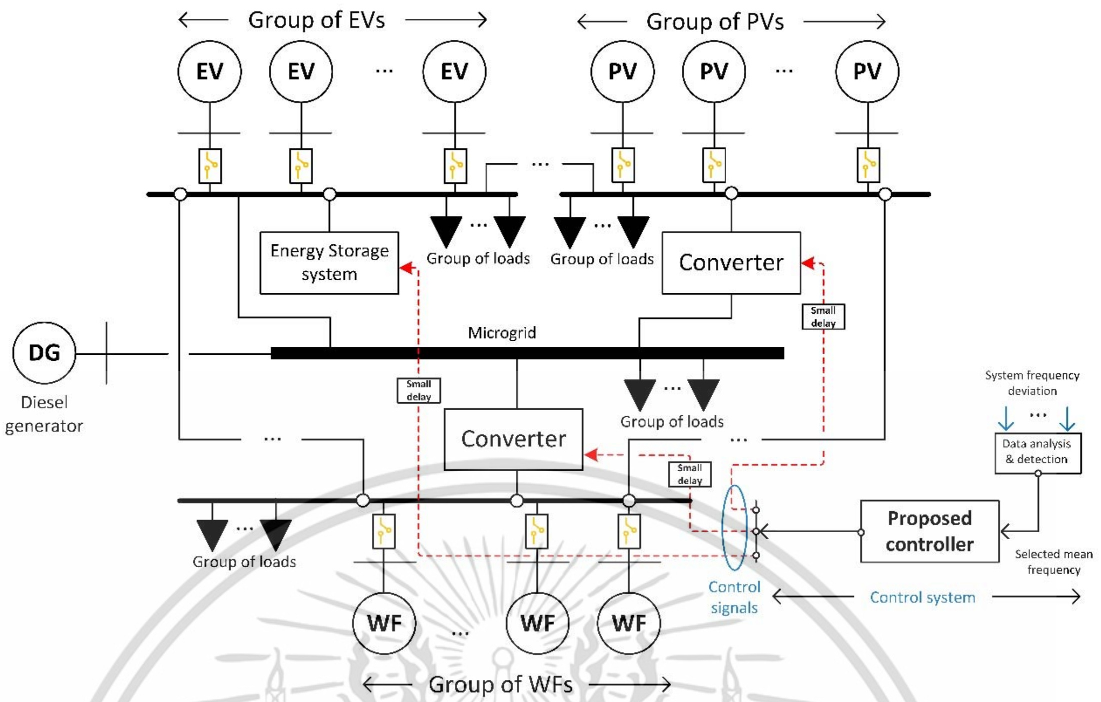
5.1 บทนำ

จากความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณโหลดที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า และการเพิ่มปริมาณการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ความไม่แน่นอนเหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จึงเป็นการศึกษาเกี่ยวการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดเพื่อเป็นแนวทางในการบริการจัดการพลังงานและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยนำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบประสานที่มีการควบคุมการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าของโรงต้นกำลัง แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (ได้แก่ พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์) ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ พลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และความต้องการพลังงานไฟฟ้าของโหลดต่าง ๆ ในระบบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ที่สามารถปรับค่า PI ได้ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [2]

5.2 การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในระบบไมโครกริด

การควบคุมแบบประสานที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นการควบคุมการทำงานร่วมกันของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าพลังงานลม แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่และการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5.1 ในการศึกษานี้จะออกแบบให้ปริมาณโหลด จำนวนรถยนต์ไฟฟ้า การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม และการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์มีความแปรปรวนซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไมโครกริด และกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ตามความต้องการของโหลด เมื่อความถี่ของระบบไมโครกริดมีการเปลี่ยนแปลงไม่ได้อยู่ในช่วงที่กำหนด ตัวควบคุมจากส่วนกลางจะสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ให้เพิ่มหรือลดกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมและแผงโซลาร์เซลล์ รวมทั้งควบคุมการทำงานของแหล่งสะสมพลังงานแบตเตอรี่และการใช้พลังงานในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า ตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีการใช้งานจริง โดยออกแบบให้สามารถปรับค่าเกน K_p และ K_I ได้อย่างอัตโนมัติเพื่อควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพและสามารถทำงานได้ภายใต้สถานการณ์ความไม่แน่นอนต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังพิจารณาผลกระทบของการหน่วงเวลาเล็กน้อยในลูปควบคุมของตัวควบคุม PI ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการทำงานจริงของระบบไมโครกริด โดยในลำดับต่อไปจะเป็นการออกแบบระบบไมโครกริดที่ใช้ในการจำลองซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 การทำงานของระบบไมโครกริด [2]

5.3 การสร้างแบบจำลองระบบไมโครกริด

ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่ใช้ในแบบจำลองระบบไมโครกริดจะถูกสร้างขึ้นจากรูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม โดยเริ่มต้นจากการกำหนดสมการสถานะของระบบไมโครกริด หลังจากนั้นจะทำการออกแบบการควบคุมเพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

5.3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ทดสอบ

โดยทั่วไปแล้ว เสถียรภาพของความถี่จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการรักษาสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [29] ความไม่สมดุลระหว่างปริมาณโหลดที่ใช้งานกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกมักเกิดขึ้นเสมอในระบบไมโครกริด สำหรับระบบไมโครกริดที่นำเสนอนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ประกอบด้วยการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า การผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ และการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า ปริมาณโหลด ความเฉื่อยของระบบ สัมประสิทธิความหน่วง และการเบี่ยงเบนความถี่ หรือสมการการแกว่งของระบบไมโครกริดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.1) ดังแสดงใน [30]

$$\sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{m,i} - \sum_{l=1}^{N_l} \Delta P_{L,l} = 2Hs(\sum_{i=1}^{N_G}(\Delta F)) + D(\sum_{i=1}^{N_G}(\Delta F)) \qquad \text{(MW)} \qquad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

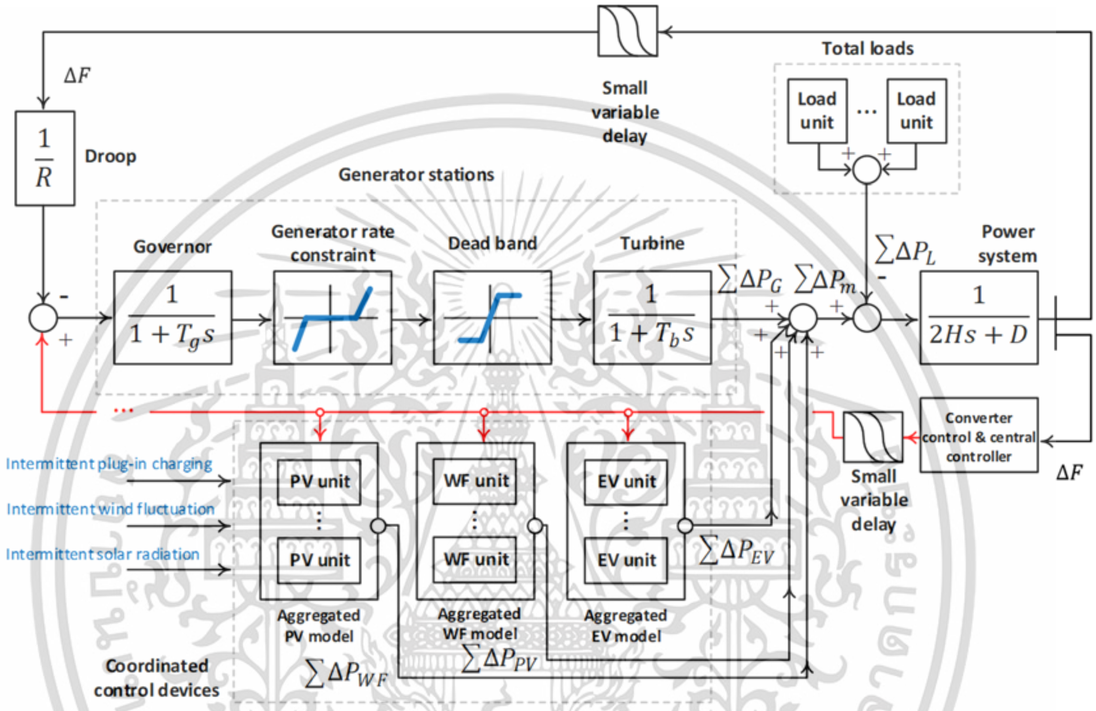
โดยที่ ΔF คือ ค่าเบี่ยงเบนความถี่

ΔP_m คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจากการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า การผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ และการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม

ΔP_L คือ การเปลี่ยนแปลงความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด

H คือ ความเฉื่อยของระบบ

D คือ ตัวประกอบการหน่วง



รูปที่ 5.2 ระบบควบคุมของระบบไมโครกริด [2]

สมมุติให้การผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม และแหล่งสะสมพลังงานแบตเตอรี่ในระบบมีความเฉื่อยน้อยมากซึ่งสามารถละเลยได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดซิงโครนัสและไมโครกริดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.2) ซึ่งมีการอธิบายไว้อย่างชัดเจนใน [13] และ [14]

$$H = \sum_{i=1}^{N_G}\left(H_{G,i}S_{G,i}\right)/S_{MG} \qquad \text{(s)} \tag{5.2}$$

โดยที่ N_G คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด

$S_{G,i}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า

$H_{G,i}$ คือ ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

S_{MG} คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเน้นการตอบสนองของความเฉื่อยในระบบไมโครกริด ความเฉื่อยที่เก็บสะสมไว้ (เช่น พลังงานจลน์) ในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจะต้านความไม่สมดุลผ่านระบบการควบคุมความเฉื่อยจนกว่าจะมีการทำงานของตัวควบคุมหลัก นอกจากนี้ ยังสามารถขจัดความเบี่ยงเบนความถี่ ด้วยการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ กังหันลม และแหล่งสะสมพลังงานแบตเตอรี่ ผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์ ทำให้ความถี่ของระบบไมโครกริดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (50 ± 0.5 หรือ 60 ± 0.6 Hz) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กลยุทธ์ในการควบคุมสองแบบ ได้แก่ การควบคุมหลัก (Droop) และการควบคุมที่ตัวคอนเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และสามารถกำหนดตัวแปรหน่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยได้ดังสมการที่ (5.3) [31]

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau} \qquad \text{(s)} \tag{5.3}$$

โดยที่ τ คือ ค่าหน่วงเวลา

$\bar{\tau}$ คือ ค่าหน่วงเวลาเฉลี่ย

$\Delta\tilde{\tau}$ คือ ผลต่างค่าหน่วงเวลา

สำหรับโดนเมนความถี่ของสมการที่ (5.3) สามารถประมาณเป็นสมการอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งได้ดังสมการที่ (5.4) [32]

$$e^{-\tau s} = \frac{1 - \tau s}{1 + \tau s} \tag{5.4}$$

โดยที่ e คือ ค่าฐานของลอการิทึมธรรมชาติ

$s = j\omega_0$ และ $j = \sqrt{-1}$

ω_0 คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (rad/s)

เมื่อแทนค่าสมการที่ (5.3) ลงในสมการที่ (5.4) จะได้

$$e^{-(\bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau})s} = \frac{1 - (\bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau})s}{1 + (\bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau})s} \tag{5.5}$$

ค่าหน่วงเวลาของตัวแปรสามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ซึ่งแสดงดังสมการ (5.6)

$$e^{-(\bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau})s} = c_{\bar{\tau}} + c_{\tilde{\tau}} \tag{5.6}$$

โดยที่ $c_{\bar{\tau}}$ และ $c_{\tilde{\tau}}$ เป็นค่าคงที่ปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่า ตัวแปรต่าง ๆ จะทำให้ระบบควบคุมทำงานผิดปกติ แต่ความล่าช้าเล็กน้อยในลูปควบคุมก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ จึงควรพิจารณาสมการที่ (5.5) และ (5.6) ในการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริดด้วย

ปัจจุบัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสในระบบไมโครกริดได้ถูกแทนที่ด้วยแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่ใช้อินเวอร์เตอร์หรือคอนเวอร์เตอร์เป็นตัวแปลงผันพลังงานและเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า ดังนั้น การตอบสนองความเฉื่อยของระบบ (H) และการแกว่งของระบบ (D) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1-10 วินาที และจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ (อนุพันธ์ความถี่ dF/dt) ของระบบไมโครกริดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนความถี่อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความถี่ตกและลดลงอย่างรวดเร็ว ระบบไมโครกริดเกิดความไม่เสถียรภาพ และนำไปสู่การเกิดเหตุการณ์ไฟดับซึ่งเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุด

ในช่วงเวลาสั้น ๆ 1 -10 วินาที วงจรควบคุมหลักอาจไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะจัดการกับสภาวะฉุกเฉินดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สถานการณ์ที่รุนแรงของความเฉื่อยที่ต่ำอันเนื่องมาจากแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ดังนั้น เพื่อการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริดให้มีประสิทธิภาพ สัญญาณจากตัวควบคุมจะถูกส่งไปยังระบบเก็บสะสมพลังงานแบตเตอรี่เพื่อควบคุมการอัดประจุและการคายประจุของรถยนต์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5.3(ก) และสัญญาณจากตัวควบคุมยังถูกนำไปประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณ PWM สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ของแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์และกังหันลมดังแสดงในรูปที่ 5.3(ข) และรูปที่ 5.3(ค) ตามลำดับ เพื่อควบคุมความถี่ของระบบไมโครกริดให้อยู่ในสภาวะที่ปกติ

5.3.2 ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบไมโครกริด

ในส่วนนี้ จะเป็นการนำเสนอความไม่แน่นอนของรูปแบบการผลิตกระแสไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์และกังหันลมที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งสร้างความรบกวนต่อตัวควบคุมสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.7) และ (5.8) ตามลำดับ โดยมีองค์ประกอบทั้งสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

$$\Delta U_{PV}(s) = \overline{U}_{PV} \pm \Delta\widetilde{U}_{PV}(s) \qquad (\mathrm{W/m^2}) \tag{5.7}$$

$$\Delta U_{WF}(s) = \overline{U}_{WF} \pm \Delta\widetilde{U}_{WF}(s) \qquad (\mathrm{m/s}) \tag{5.8}$$

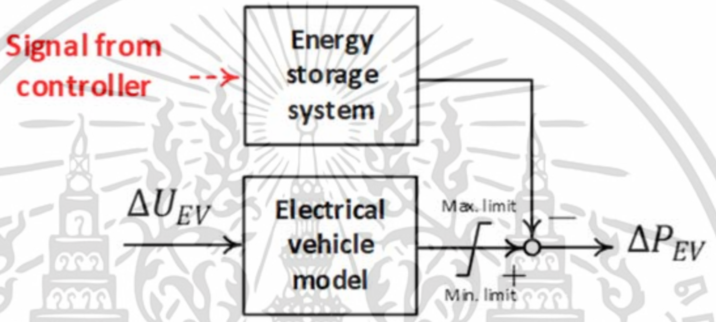
โดยที่ $\overline{U}_{PV}$ และ $\overline{U}_{WF}$ เป็นค่าเฉลี่ยการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และความเร็วลม ตามลำดับ และ $\Delta\widetilde{U}_{PV}$ และ $\Delta\widetilde{U}_{WF}$ เป็นการแปรผันของการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และความเร็วลม ตามลำดับ ซึ่งสมการที่ (5.7) และ (5.8) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบไมโครกริดเกิดการเบี่ยงเบนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

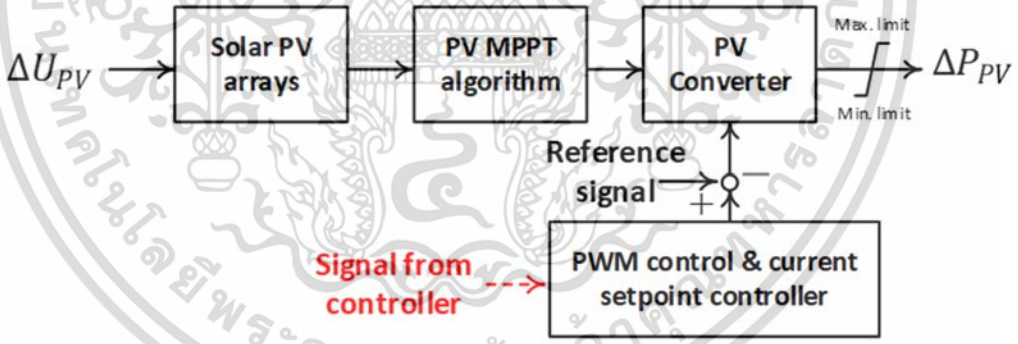
สำหรับการแปรผันจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองจะเป็นไปตามสมการที่ (5.9)

$$\Delta U_{EV}(s)=\sum_{i=1}^{N_{EV}}\left(L_{EV}P^{r}_{EV,i}\right) \tag{5.9}$$

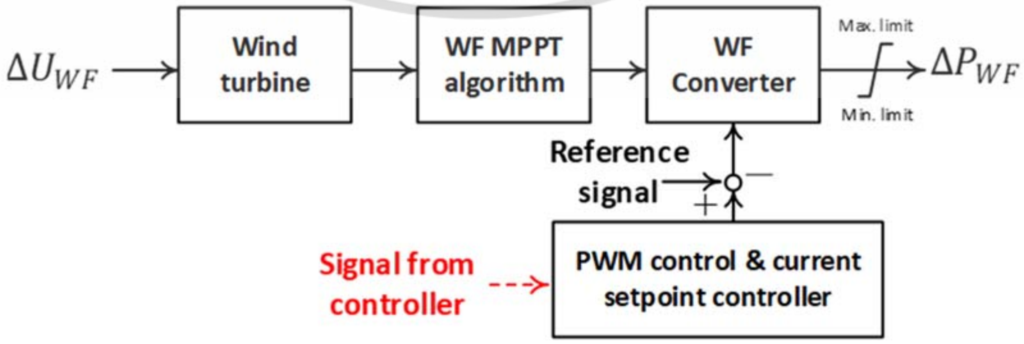
โดยที่ N_{EV} คือ จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดที่เชื่อมต่อในระบบไมโครกริด L_{EV} เป็นตัวเลขเชิงตรรกะ (0 หรือ 1) และ $P^{r}_{EV,i}$ คือ พิกัดกำลังไฟของรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละคัน ในความเป็นจริงจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่สถานีอัดประจุนั้นจะแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ ความแปรผันของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าจึงส่งผลกระทบต่อการเบี่ยงเบนความถี่ของระบบไมโครกริดเช่นเดียวกับการแปรผันของการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และความเร็วลม



(ก) บล็อกควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ของระบบอัดประจุและคายประจุรถยนต์ไฟฟ้า



(ข) บล็อกควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ของแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์



(ค) บล็อกควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ของแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลม

รูปที่ 5.3 บล็อกฟังก์ชันและสัญญาณของระบบควบคุม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลายประเภทและโหลดประเภทต่าง ๆ เพื่อให้การจำลองมีลักษณะคล้ายกับการทำงานจริงของระบบไมโครกริด ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าหลักของระบบไมโครกริดขนาด 15 MW ปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดในระบบมีค่าประมาณ 55 MW แหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลมขนาด 7 MW จำนวน 3 ชุด แหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 5 MW จำนวน 3 ชุด ค่าความจุแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าขนาด 0.1 MW จำนวน 30 คัน และสมมติให้ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่มีขนาดเท่ากับกำลังไฟฟ้าของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดที่เชื่อมต่ออยู่ที่บัสเดียวกัน เพื่อควบคุมพลังงานที่ใช้ของรถยนต์ไฟฟ้าเหล่านั้น ในการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริด ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมและโซลาร์เซลล์ และจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไมโครกริดจะเป็นแบบสุ่ม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุม ซึ่งในการจำลองได้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าฐานของระบบมีค่าเท่ากับ 20 MW

ระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 5.2 ได้รับการศึกษาและพัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ความถี่ของระบบไมโครกริดแบบไดนามิกส์ โดยมี Governor เป็นตัวควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (GRC) และมีตัวควบคุมความถี่โหลด (LFC) แบบหน่วงเวลาที่สามารถตรวจจับความถี่ได้อย่างแม่นยำเป็นตัวควบคุมรอง การควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดย Governor ถูกจำกัดที่ 0.06% หรือ 0.035 Hz ($\approx$ 10% - 15% MW/min) การหน่วงเวลาการควบคุมอยู่ระหว่าง 0 - 0.05 วินาที (การควบคุมแบบ Droop การควบคุมแหล่งสะสมพลังงาน และการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในระบบ) เพื่อรักษาเสถียรภาพความถี่ของระบบในระหว่างที่เกิดเหตุฉุกเฉิน และมีระบบกักเก็บพลังงานที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ของระบบได้ภายใน 10 วินาที เพื่อปรับสมดุลกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครกริด สำหรับตัวควบคุมหลักของระบบ (Governor) จะถูกใช้ควบคุมความถี่ของระบบเพื่อปรับความถี่ให้เข้าสู่เสถียรภาพหรือสภาวะคงตัวใหม่ภายใน 10 - 30 วินาที นอกจากนี้ ระบบควบคุมยังสามารถกู้คืนความถี่ของระบบไมโครกริดให้กลับเข้าสู่สภาวะปกติภายใน 10 - 30 นาที หากเกิดข้อผิดพลาดจากการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

จากความต้องการโหลดที่ไม่แน่นอน ไม่ว่าจะเป็นโหลดในเขตนิคมอุตสาหกรรม เขตเศรษฐกิจ หรือเขตที่อยู่อาศัย การเปลี่ยนแปลงของโหลดเหล่านี้ถือว่าเป็นการรบกวนระบบไมโครกริด เนื่องจาก การใช้ไฟในเขตพื้นที่ต่าง ๆ ไม่มีความสม่ำเสมอและไม่มีการควบคุมความถี่ของระบบ ดังนั้น แบบจำลองอย่างง่ายที่นำเสนอนี้จึงมีความแม่นยำและเพียงพอสำหรับใช้ในการศึกษา สามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะการรบกวนที่หลากหลาย นอกจากนี้ คอนเวอร์เตอร์ยังสามารถกู้คืนความถี่ของระบบได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงมั่นใจได้ว่าการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในระบบไมโครกริดจะมีประสิทธิภาพและทำให้ค่าเบี่ยงเบนความถี่กลับเข้าสู่สภาวะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเบี่ยงเบนความถี่ของระบบจะพิจารณาจากผลกระทบที่เกิดขึ้นในสภาวะไดนามิกจากการผลิตกระแสไฟฟ้า การใช้กำลังไฟฟ้าของโหลด การควบคุมความเฉื่อยของระบบ การควบคุมแบบ Droop การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ซึ่งได้แก่ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ และการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังนี้ [13], [14]

$$\Delta F(s)=\frac{1}{2Hs+D}\left(\sum_{i=1}^{N_G}\Delta P_{m,i}-\sum_{l=1}^{N_l}\Delta P_{L,l}\right) \quad \text{(Hz)} \qquad (5.10)$$

เมื่อใช้งานกับระบบที่ศึกษา จะได้

$$\Delta F(s)=\frac{1}{2Hs+D}\left(\left(\sum\Delta P_G+\sum\Delta P_{EV}+\sum\Delta P_{PV}+\sum\Delta P_{WF}\right)-\sum_{l=1}^{N_l}\Delta P_{L,l}\right) \quad \text{(Hz)} \qquad (5.11)$$

โดยที่ $\{\Delta P_{EV}\,\Delta P_{PV}\,\Delta P_{WF}\}\in\Delta P_{m,i}$

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมที่นำเสนอดังแสดงในรูปที่ 5.2 สามารถเขียนสมการสถานะได้ดังสมการที่ (5.12) และ (5.13)

$$\Delta\dot{X}(s)=A\Delta X(s)+B\Delta U(s) \qquad (5.12)$$

$$\Delta Y(s)=C\Delta X(s)+D\Delta U(s) \qquad (5.13)$$

กำหนดให้ไม่มีการควบคุมแบบ Feed Forward ในระบบ ดังนั้น จะได้ D = [0] เมื่อแทนค่าสมการที่ (5.4) - (5.6) ลงในสมการที่ (5.12) และ (5.13) รวมทั้งตัวแปรการหน่วงสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทของตัวควบคุมจะได้

$$\Delta\dot{X}(s)=A\Delta X(s)+B\Delta U(s)\cdot e^{\tau s} \qquad (5.14)$$

$$\Delta Y(s)=C\Delta X(s)\cdot e^{\tau s} \qquad (5.15)$$

โดยที่ $\dot{X}$ คือ อนุพันธ์ของตัวแปรสถานะในระบบไมโครกริด X, U และ Y คือ เวกเตอร์สถานะอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ ส่วน A, B, C และ D คือ เมทริกสถานะอินพุท เอาต์พุท และ Feed Forward ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนสมการการควบคุมการป้อนกลับแบบวงรอบปิดของระบบในรูปที่ 5.2 ได้ดังสมการที่ (5.16)

$$\Delta\dot{X}_{cl}'(s) = (A\text{-}BU(s)\cdot e^{\tau s})\cdot\Delta X_{cl}(s)$$

$$= (A\text{-}BU(s)\cdot P(s))\cdot\Delta X_{cl}(s)$$

$$= [A\Delta X_{cl}(s)]\text{-}\ [B'U'(s)\cdot\Delta X_{cl}'(s)] \tag{5.16}$$

โดยสัญลักษณ์ ’ หมายถึงตัวแปรสัญญาณที่มีการหน่วงเวลา และ $P(s)$ คือ เมทริกซ์พหุนามของของตัวแปรที่มีการหน่วงเวลา

จากสมการที่ (5.16) เมื่อเขียน $K(s)$ ในรูปของเอาท์พุท ΔY และสัญญาณควบคุม ΔU ใหม่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.17)

$$\Delta\dot{X}_{cl}'(s) = [A\Delta X_{cl}(s)]\text{-}\ [B'C'(s)\Delta X'(s)K(s)\cdot\Delta X_{cl}'(s)] \tag{5.17}$$

โดยที่สัญลักษณ์ cl หมายถึง สัญญาณควบคุมของระบบแบบวงรอบปิด จะเห็นได้ว่าการหน่วงเวลาส่งผลกระทบต่อเทอมที่สองของสมการที่ (5.17) และลดความเสถียรของลูปควบคุม

ในที่นี้กำหนดให้ $K(s)$ คือ ตัวควบคุม PI แบบปรับตัวได้ที่ประกอบด้วย K_p และ K_i ตามสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.18) โดยที่สัญลักษณ์ k หมายถึง การดำเนินการลำดับที่ k^{th}

$$K_k(s) = K_{p,k}+K_{i,k}\,s \tag{5.18}$$

5.3.4 ตัวควบคุม PI Controller ที่ใช้ในการศึกษา

จากการทำงานของระบบไมโครกริดที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โครงสร้างของตัวควบคุมแบบโดเมนเวลา (Time Domain; t) อาจไม่สามารถควบคุมความถี่ของระบบภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ได้ เพื่อให้ตัวควบคุมแบบ PI สามารถทำงานภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ ได้ ตัวควบคุม PI ที่ใช้งานจะเป็นแบบวงรอบปิด ซึ่งสามารถแสดงสมการสถานะได้ดังสมการที่ (5.19)

$$\Delta\dot{X}_{cl,k}(t) = A'_{cl,k}(t)X'_{cl,k}(t) \tag{5.19}$$

โดยที่ $A_{cl,k}$ คือ เมทริกซ์สถานะวงรอบปิด และ K_k คือ จุดดำเนินการที่ k^{th} ใด ๆ เมื่อเขียนสมการที่ (5.19) ให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบเมทริกซ์จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{X'}_{cl,k}(t)=\begin{bmatrix} a_{11,k}(t) & \dots & a_{1m,k}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1,k}(t) & \dots & a_{mm,k}(t) \end{bmatrix}_{m\times m} \begin{bmatrix} x_{1,cl}\pm\Delta x_{1,k}(t) \\ \vdots \\ x_{m,cl}\pm\Delta x_{m,k}(t) \end{bmatrix}_{m\times 1} \tag{5.20}$$

เมื่อ $a_{11,k},...,a_{mm,k}$ เป็นองค์ประกอบของ $A_{cl,k}$ และ $x_{1,cl},...x_{m,cl}$ เป็นองค์ประกอบของ $X_{cl,k}$ ในสภาวะคงตัว $\Delta x_{1,k},...,\Delta x_{m,k}$ เป็นองค์ประกอบของ $X_{cl,k}$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และ m เป็นมิติของเมทริกซ์

กำหนดให้ $\dot{F}_k$ เป็นอนุพันธ์ของความถี่ของระบบที่การดำเนินการ k ใด ๆ จะได้ $f_{1,k},...,f_{n,k}$ เป็นตัวแปรสถานะที่สอดคล้องกับความถี่ของระบบ และ $d^f_{11,k},...,d^f_{nn,k}$ เป็นองค์ประกอบของเมทริกซ์ความถี่ โดยที่ $\dot{F}_k \in \dot{X}_{cl,k}$ และ $n < m$ เมื่อคิดเฉพาะค่าความถี่สามารถเขียนสมการที่ (5.20) ได้ดังสมการที่ (5.21) และ (5.22)

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_{1,k}(t) \\ \vdots \\ \dot{f}_{1,k}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^f_{11,k} & \dots & d^f_{1n,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d^f_{n1,k} & \dots & d^f_{nn,k} \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{bmatrix} f\pm\Delta f_{1,k}(t) \\ \vdots \\ f\pm\Delta f_{m,k}(t) \end{bmatrix} \tag{5.21}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_{1,k}(t) \\ \vdots \\ \dot{f}_{n,k}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^f_{11,k}(t)\left(f\pm\Delta f_{1,k}(t)\right)+\dots+d^f_{1n,k}(t)\left(f\pm\Delta f_{n,k}(t)\right) \\ \vdots \\ d^f_{n1,k}(t)\left(f\pm\Delta f_{1,k}(t)\right)+\dots+d^f_{nn,k}(t)\left(f\pm\Delta f_{n,k}(t)\right) \end{bmatrix}_{\text{nx1}} \tag{5.22}$$

จากสมการที่ (5.22) เมื่อลดรูป $d^f_{11,k},...,d^f_{nn,k}$ ให้อยู่ในรูป K_k ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม ทำให้ผลการเบี่ยงเบนความถี่ $\Delta f_{1,k},...,\Delta f_{n,k}$ มีค่าลดลง ผลลัพธ์ที่ได้จากการลดรูปสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.23)

$$\min\begin{Bmatrix} |d^f_{11,k}| & \dots & |d^f_{1n,k}| \\ & \vdots & \\ |d^f_{n1,k}| & \dots & |d^f_{nn,k}| \end{Bmatrix} \tag{5.23}$$

โดยที่ min คือ ค่าต่ำสุด และ | · | คือ ค่าสัมบูรณ์ ซึ่งเงื่อนไขการควบคุมความถี่ของระบบไมโครกริดเป็นไปตามสมการที่ (5.24)

$$0.95f < f < 1.05f \qquad \text{(Hz)} \tag{5.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.5 อัลกอริธึมการควบคุมแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ

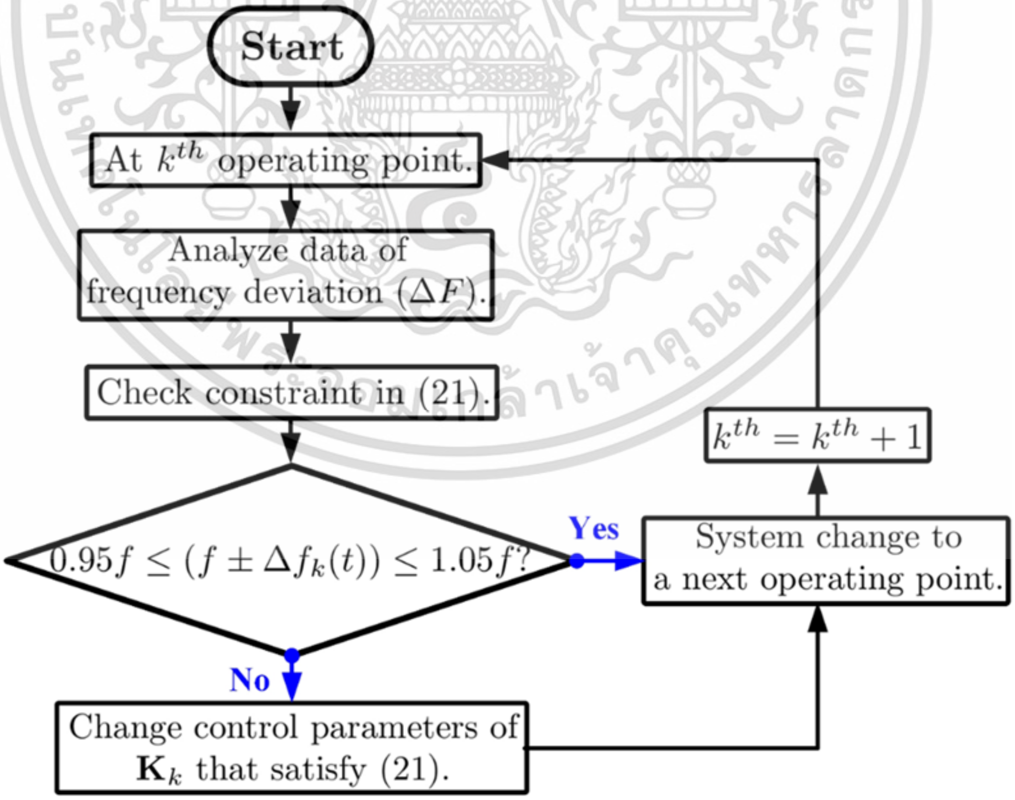
อัลกอริธึมการควบคุมแบบที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 อัลกอริธึมนี้จะถูกนำไปใช้ควบคุมการทำงานของพารามิเตอร์ K_k เพื่อหาค่าต่ำสุดดังแสดงในสมการที่ (5.23) ภายใต้เงื่อนไขของสมการที่ (5.24) โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

1) ในการดำเนินการที่ลำดับ k^{th} ใด ๆ สามารถวิเคราะห์การเบี่ยงเบนความถี่ ΔF ได้

2) ค่าการเบี่ยงเบนความถี่ (ΔF) ที่ได้จะเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (5.24) คือ $0.95f < (f \pm \Delta f_k(t)) < 1.05f$ โดยจะค้นหาพารามิเตอร์ $K_{p,k}$ และ $K_{i,k}$ ดังแสดงในสมการที่ (5.23) ที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในการควบคุม แต่ถ้าความถี่ของระบบไมโครกริดไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (5.24) ระบบการควบคุมจะเปลี่ยนการดำเนินการเป็นลำดับถัดไป คือ $k^{th} = (k + 1)^{th}$

3) สำหรับการดำเนินการในลำดับที่ $k^{th} = (k + 1)^{th}$ จะเข้าสู่ขั้นตอนในข้อที่ 1) ใหม่และวนลูปซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ

การทำซ้ำขั้นตอนที่ 1) ถึงขั้นตอนที่ 3) จะทำให้ค่าของสมการที่ (5.23) ลดลงในทุก ๆ จุดการดำเนินการ ผลที่ตามมา คือ สามารถช่วยลดและหยุดการแกว่งของความถี่ในระบบไมโครกริดได้ ซึ่งการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับระบบควบคุมจะใช้อัลกอริธึมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [34], [35]



รูปที่ 5.4 ผังการทำงานของระบบการควบคุมที่นำเสนอ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับข้อดีของตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเดิม คือ

1. ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์การควบคุมได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อให้เป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสมการที่ (5.23) ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของสมการที่ (5.24) เป็นผลให้สามารถระงับความผันผวนของความถี่ในระบบไมโครกริดได้

2. การหาค่าที่เหมาะสมในการควบคุมเป็นการกระทำบนโดเมนความถี่ ส่งผลให้ระบบมีการทำงานที่รวดเร็วและมีความเหมาะสมกับการควบคุมการทำงานแบบเรียลไทม์

หลังจากการออกแบบระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย การกำหนดประเภทของแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าและโหลด การกำหนดปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อความถี่ของระบบไมโครกริด การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ และการออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้เพื่อควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด ในลำดับถัดไปจะเป็นการนำเสนอผลการจำลองการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริดที่ได้ทำการศึกษาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งอภิปรายผลที่เกิดขึ้นจากการจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการจำลองการควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด

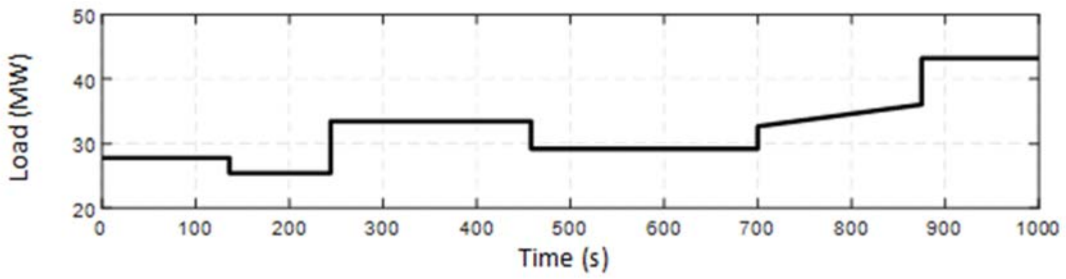
ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่นำเสนอซึ่งออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (5.23) และใช้อัลกอริทึมแบบปรับตัวได้ดังแสดงในรูปที่ 5.4 เพื่อทดสอบการทำงานของระบบที่แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2 ในการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดนั้นได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ทำงานร่วมกับบล็อกฟังก์ชันเสริม ได้แก่ Control System Toolbox [36], Signal Processing Toolbox [37] และ Optimization Toolbox [38] ซึ่งพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 สำหรับผลการจำลองนั้นจะเป็นการศึกษากรณีตัวอย่างและเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้เมื่อระบบถูกควบคุมด้วยค่า PI แบบปรับตัวได้กับค่า PI แบบคงที่ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมโดยคำนวนได้จากสมการที่ (5.23) ในสภาวะที่เวลา t = 0 วินาที

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม

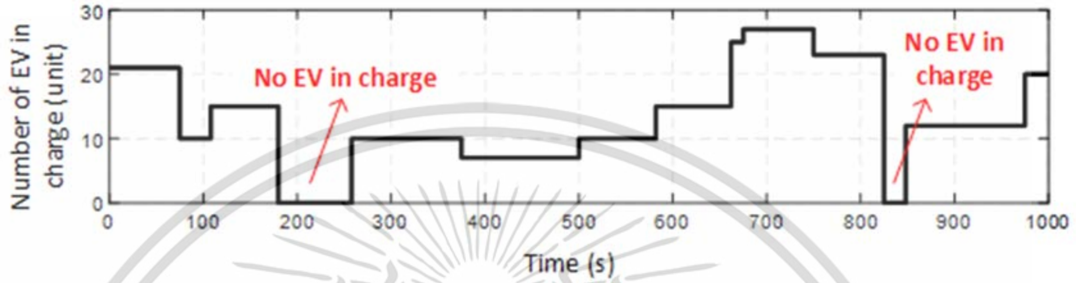
Parameter	Value
Damping coefficient, D	0.02 pu
Inertia constant, H	0.080 pu
Governor time constant, T_g	0.12 s
Turbine constant, T_b	0.43 s
Droop, R	1.75
Maximum limit of PI controller	+0.2 pu
Minimum limit of PI controller	-0.2 pu

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ประกอบด้วย รูปแบบการใช้งานโหลด จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่อัดประจุ ความเร็วลม การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ และสัญญาณหน่วงเวลา ในการทดสอบระบบที่ทำการศึกษาค่าตัวแปรเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเพื่อทดสอบเสถียรภาพของระบบไมโครกริด โดยเงื่อนไขของตัวแปรต่าง ๆ คือ ค่าของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 25 - 45 MW ดังแสดงในรูปที่ 5.5(ก) จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ทำการอัดประจุแบตเตอรี่แสดงดังรูปที่ 5.5(ข) ซึ่งในช่วงเวลา 180 - 350 s และ 820 - 840 s ไม่มีการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ความเร็วลมอยู่ในช่วงที่ 6 - 15 m/s และในช่วงเวลา 120 - 500 s ลมมีความแปรปรวนอย่างกะทันหันจากประมาณ 5 m/s เป็น 15 m/s ดังแสดงในรูปที่ 5.5(ค) ความเข้มแสงของดวงอาทิตย์มีความแปรปรวนอยู่ในช่วง 250 - 375 W/m^2 ดังแสดงในรูปที่ 5.5(ง) นอกจากนี้ ยังมีผลกระทบจากความล่าช้าของสัญญาณทั้งสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทของตัวควบคุมดังแสดงในรูปที่ 5.5(จ)

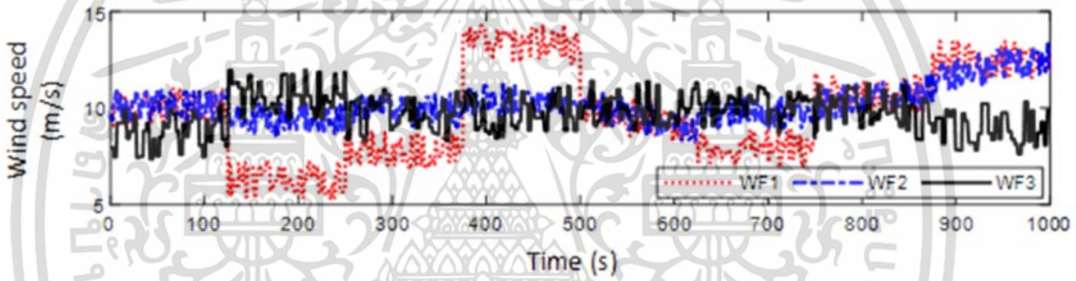
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



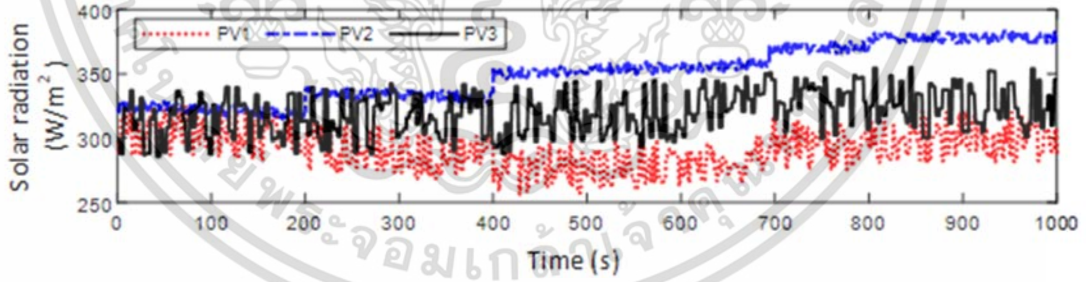
(ก) โหลดที่ใช้งานในระบบไมโครกริด



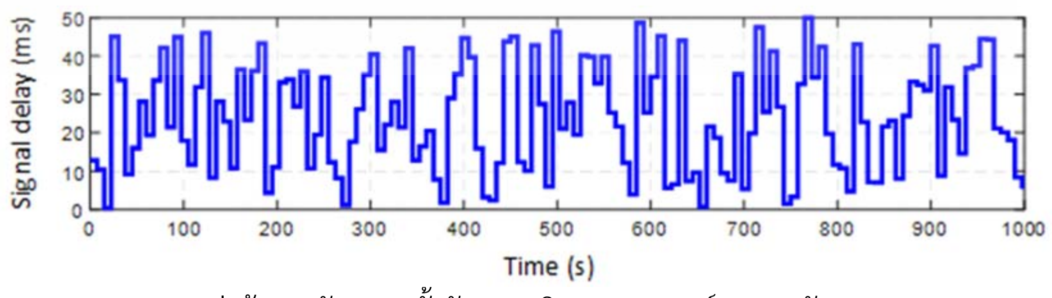
(ข) จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ทำการอัดประจุแบตเตอรี่



(ค) ความเร็วลม



(ง) ความเข้มแสงของดวงอาทิตย์



(จ) ความล่าช้าของสัญญาณทั้งสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทของตัวควบคุม

รูปที่ 5.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบควบคุม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6(ก) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ได้จากการทำงานของตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่ และแบบที่ไม่มีการควบคุม ในสภาวะเริ่มต้นที่เวลา t = 0 s ได้กำหนดให้ระบบไมโครกริดมีปริมาณโหลดเพียงเล็กน้อย มีการเชื่อมต่อกับกังหันลม 2 ชุด และเชื่อมต่อกับโซลาร์เซลล์ 1 ชุดเท่านั้น และกำหนดค่าความถี่ของระบบไมโครกริดที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไม่เกิน 5 % หรือ 0.5 pu หากระบบไมโครกริดมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่มากกว่านี้จะถือว่าตัวควบคุมไม่สามารถควบคุมการทำงานได้

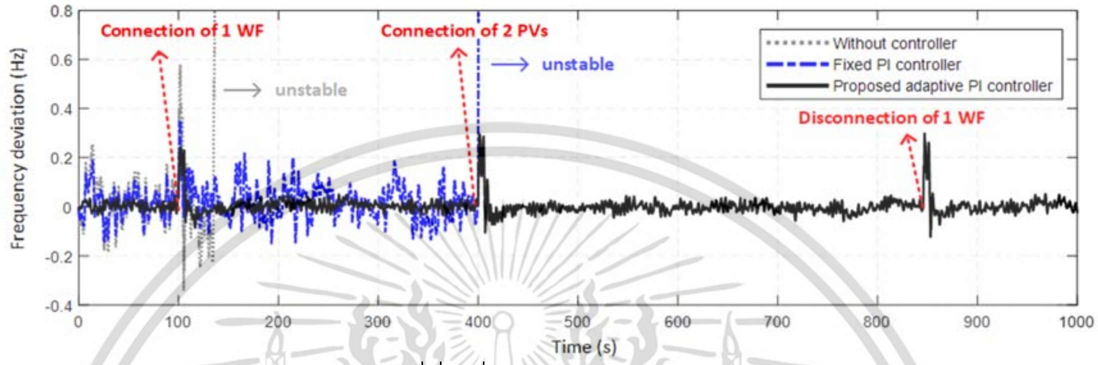
ในช่วงเวลา 0 - 100 s ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่มีการปรับค่า PI อย่างอัตโนมัติสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่และแบบที่ไม่มีการควบคุม ในวินาทีที่ 100 s มีการเชื่อมต่อชุดกังหันลมเข้ากับระบบไมโครกริดอีก 1 ชุด จะพบว่า ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สามารถควบคุมการทำงานได้เป็นอย่างดี ส่วนตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่ ยังคงสามารถควบคุมการทำงานของระบบให้มีเสถียรภาพได้ และระบบไมโครกริดจะสูญเสียเสถียรภาพหากไม่มีการควบคุมการทำงาน ซึ่งภาพขยายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6(ข)

ในช่วง 100 - 400 s สามารถสังเกตได้ชัดเจนว่าที่ประมาณ t = 120 s ระบบไมโครกริดที่ไม่มีตัวควบคุมจะสูญเสียเสถียรภาพและไม่สามารถทำงานได้ เมื่อเวลาผ่านไปได้มีการเพิ่มปริมาณโหลดที่ใช้งาน ทำให้มีการเชื่อมต่อกังหันลมและโซลาร์เซลล์เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่เพิ่มขึ้น กระทั่งเวลา t = 400 s ตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่ไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ทำให้ระบบไมโครกริดเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ แต่ในทางตรงกันข้ามตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ยังสามารถควบคุมการทำงานได้เป็นอย่างดีและควบคุมค่าความถี่ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 5.6(ค)

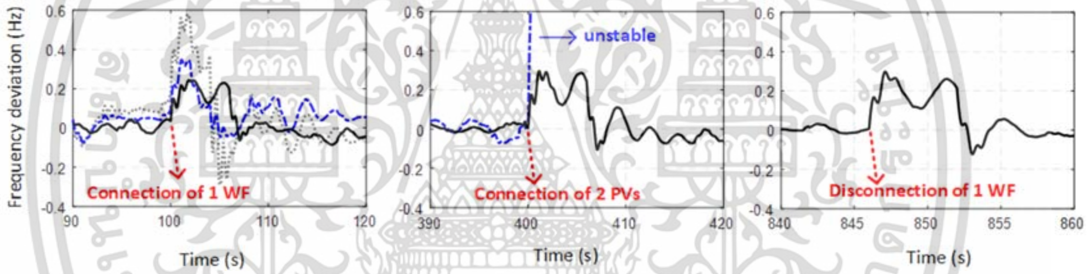
สำหรับในช่วงเวลา 400 - 1,000 s ถึงแม้ว่า ค่าต่าง ๆ ของระบบไมโครกริดจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มและลดปริมาณของโหลด การเพิ่มและลดปริมาณของรถยนต์ไฟฟ้า การเพิ่มและลดปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมและโซลาร์เซลล์ และการมีสัญญาณรบกวนหรือความล่าช้าของการส่งสัญญาณควบคุม ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ยังสามารถควบคุมการทำงานของระบบได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 5.6(ง) โดยสามารถปรับค่า PI ที่ใช้ในการควบคุมได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบค่า PI ของตัวควบคุมแบบปรับตัวได้กับค่า PI ของตัวควบคุมแบบคงที่ที่เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ควบคุมระบบในช่วงเริ่มต้นการทำงานได้ดังรูปที่ 5.7 สำหรับรูปที่ 5.8 เป็นรูปแบบการหน่วงเวลาแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา โดยรูปแบบที่ 1 เป็นการหน่วงเวลาแบบคงที่ที่เพิ่มขึ้นตามโดเมนเวลา ส่วนรูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3 เป็นการหน่วงเวลาที่เกิดจากวัดและส่งข้อมูลในระยะไกล ดังแสดงในรูปที่ 5.8(ก) รูปที่ 5.8(ข) และรูปที่ 5.8(ค) ตามลำดับ [39] ซึ่งในการจำลองได้ตั้งค่าการหน่วงเวลาของสัญญาณไว้ที่ 25 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบจากการหน่วงเวลาในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดกับตัวควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลการทำงานระหว่างตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่กับตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ โดยพบว่า ตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่จะไม่สามารถทำงานได้เมื่อเจอการหน่วงเวลาแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะการหน่วงเวลาแบบที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 5.9(ก) ส่วนตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สามารถจัดการกับผลกระทบจากการหน่วงเวลาทั้ง 3 รูปแบบ ได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 5.9(ข)



(ก) ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในระบบไมโครกริด



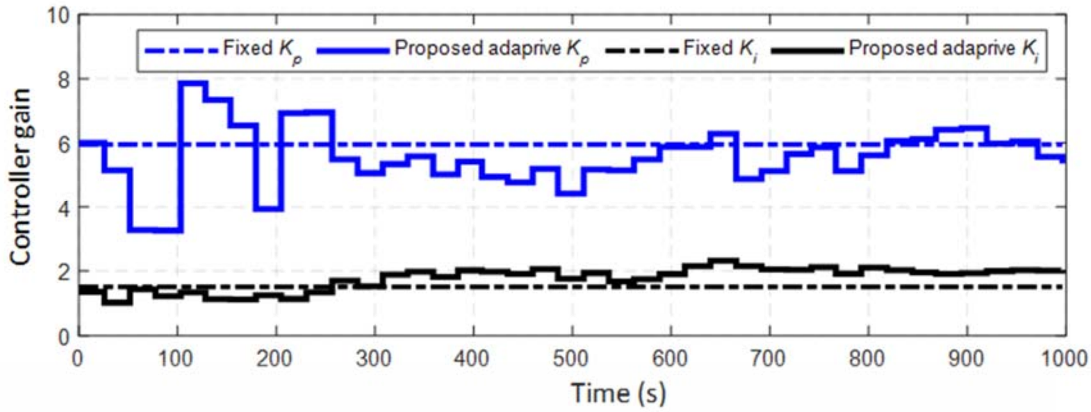
(ข) ภาพขยาย ในวินาทีที่ 90-120

(ค) ภาพขยาย ในวินาทีที่ 390-420

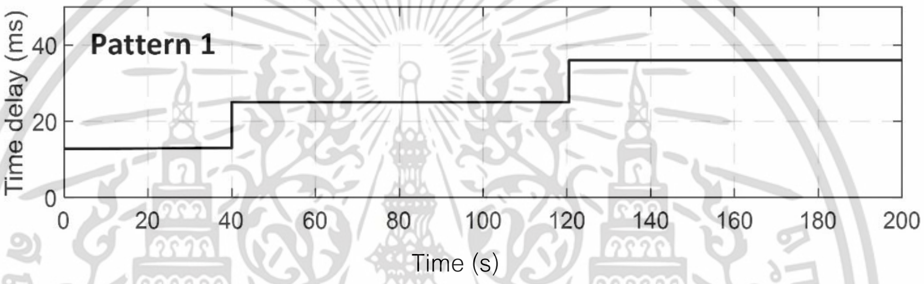
(ง) ภาพขยาย ในวินาทีที่ 840-860

รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดที่ศึกษา [2]

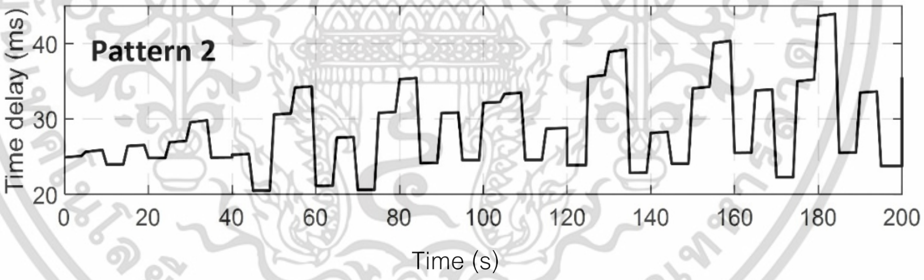
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



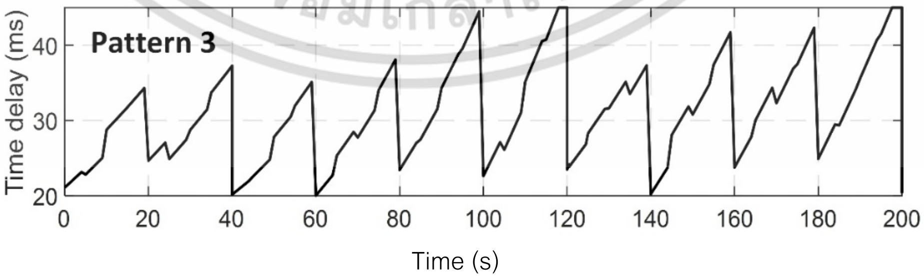
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบค่า PI ของตัวควบคุมแบบปรับตัวได้กับค่า PI ของตัวควบคุมแบบคงที่ [2]



(ก) การหน่วงเวลาแบบคงที่



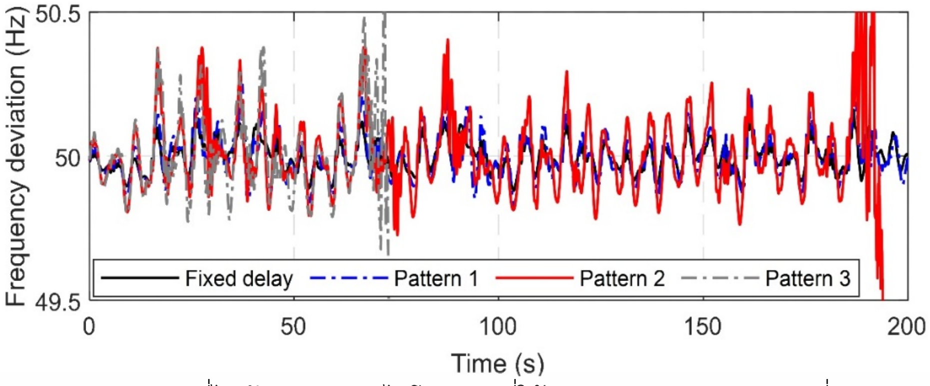
(ข) การหน่วงเวลาที่เกิดจากวัดและส่งข้อมูลในระยะไกลแบบที่ 1



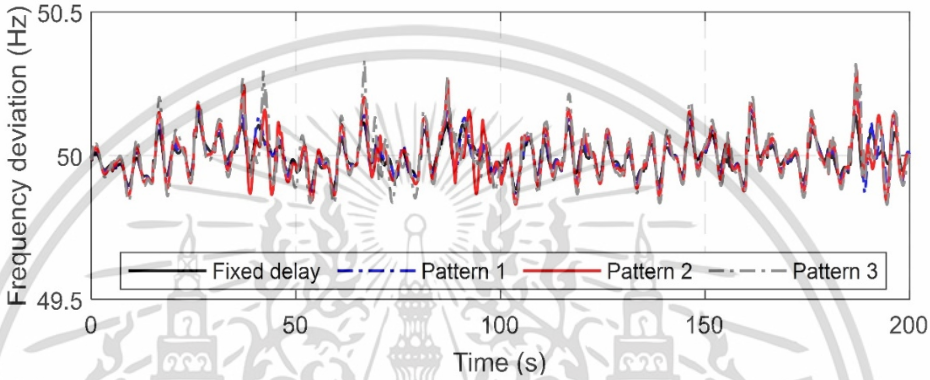
(ค) การหน่วงเวลาที่เกิดจากวัดและส่งข้อมูลในระยะไกลแบบที่ 2

รูปที่ 5.8 รูปแบบการหน่วงเวลาแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความถี่ไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่ใช้ตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่



(ข) ความถี่ไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่ใช้ตัวควบคุมแบบค่า PI แบบปรับตัวได้

รูปที่ 5.9 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไมโครกริดจากการหน่วงเวลาในรูปแบบต่าง ๆ [2]

5.5 บทสรุป

จากการศึกษาการทำงานของระบบไมโครกริดที่มีการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ทำงานร่วมกับบล็อกฟังก์ชันเสริม ได้แก่ Control System Toolbox, Signal Processing Toolbox และ Optimization Toolbox ซึ่งใช้เทคนิคการควบคุมแบบประสานในการทำงานร่วมกันระหว่างแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าของโรงต้นกำลัง แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ซึ่งได้แก่ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ พลังงานที่สะสมอยู่ในแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า และการใช้งานโหลดต่าง ๆ ผลที่ได้ พบว่า ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอซึ่งสามารถปรับค่า PI ได้อย่างอัตโนมัติ สามารถควบคุมการทำงานและรักษาเสถียรภาพของระบบไมโครกริดได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าและความต้องการใช้งานโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด รวมถึงการเกิดสัญญาณรบกวนหรือการหน่วงเวลาของสัญญาณควบคุมก็ตาม ซึ่งผิดกับกรณีของตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่ที่สามารถควบคุมการทำงานและรักษาเสถียรภาพของระบบได้ในกรณีที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนกรณีของระบบที่ไม่มีตัวควบคุม ระบบไมโครกริดจะสูญเสียเสถียรภาพทันทีเมื่อโหลดและแหล่งจ่ายพลังงานมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

6.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าและศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด โดยทำการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ที่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้เร็วกว่าเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าทั่วไปและลดอุณหภูมิขณะทำการอัดประจุเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ มีการต่อยอดงานวิจัยด้วยการพัฒนาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ และจำลองการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยผลการศึกษาในแต่ละส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้

เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบพัลส์ความถี่ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน CHAdeMO ขนาด 50 kW ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นนี้ สามารถทำงานได้ 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่ และโหมดการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ เมื่อทำการทดสอบกับรถยนต์ไฟฟ้าจริงยี่ห้อ Nissan Leaf ที่มีแบตเตอรี่ขนาด 24 kWh และทำการทดสอบในช่วงค่า %SOC ของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเท่ากับ 20%-80% พบว่า การอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงกระแสไฟฟ้าคงที่ใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 30 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 10 kWh ส่วนการอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ความถี่ช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่ใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 15.8 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 9.3 kWh เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO ทั่วไป ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน คือ 50 kW พบว่า เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามาตรฐาน CHAdeMO ทั่วไปใช้เวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ 22 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 10 kWh ซึ่งเห็นได้ว่า เทคนิคการอัดประจุแบบพัลส์ความถี่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่สามารถลดเวลาในการอัดประจุได้ถึง 6.2 นาที นอกจากนี้ ยังสามารถลดอุณหภูมิขณะอัดประจุแบตเตอรี่ที่มีผลต่ออายุการใช้งานได้อีก 0.21 ℃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard นับว่าเป็นอีกหนึ่งความสำเร็จของการต่อยอดงานวิจัยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่เชิงพาณิชย์ ซึ่งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard ที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า 3 มาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐาน AC Type 2 มาตรฐาน CHAdeMO และมาตรฐาน CCS สามารถอัดประจุได้กับรถยนต์ไฟฟ้าทุกรุ่นทุกยี่ห้อที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และช่วยลดปัญหาความแตกต่างของมาตรฐานการอัดประจุแบตเตอรี่ของบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ จากการทดสอบการทำงานจริงกับรถยนต์ไฟฟ้าทั้ง 16 รุ่น พบว่า เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Multi-Standard สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีโปรโตคอลกลางที่ง่ายต่อการสื่อสาร มีความยืดหยุ่นในการสื่อสารข้อมูลสูง ง่ายต่อการพัฒนาและการบริหารจัดการในอนาคต และเหมาะสำหรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

งานวิจัยในส่วนสุดท้าย เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด พบว่า ความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก การเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดอย่างฉับพลัน และการอัดประจุแบตเตอรี่ของถยนต์ไฟฟ้า จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อความถี่ไฟฟ้าของระบบไมโครกริด ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับ คือ การใช้เทคนิคการควบคุมแบบประสาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา กำหนดประเภทของแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าและโหลด กำหนดปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อความถี่ของระบบไมโครกริด กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ และการออกแบบตัวควบคุมแบบ Adaptive เพื่อควบคุมการทำงานของระบบไมโครกริด โดยในการศึกษาจะใช้ควบคุมแบบ Adaptive ที่ได้ทำการออกแบบไว้ไปควบคุมการทำงานร่วมกันของเครื่องจักรกลไฟฟ้าของโรงต้นกำลัง แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (ได้แก่พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์) ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ พลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และความต้องการพลังงานไฟฟ้าของโหลดต่าง ๆ ในระบบ ผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่า ตัวควบคุมแบบ Adaptive ที่สามารถปรับค่า PI ได้อย่างอัตโนมัติที่นำเสนอสามารถควบคุมการทำงานและรักษาเสถียรภาพของระบบไมโครกริดได้เป็นอย่างดี ส่วนตัวควบคุมแบบค่า PI คงที่และระบบไมโครกริดที่ไม่มีตัวควบคุมเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ความถี่ไฟฟ้าของระบบจะแกว่งค่อนข้างสูงและระบบจะสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้ คือ ระบบควบคุมแบบประสานโดยใช้ตัวควบคุมแบบ Adaptive ที่สามารถปรับค่า PI ได้อย่างอัตโนมัติเป็นการจำลองการทำงานในระบบไมโครกริด ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก มีความเป็นอิสระจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก และสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานได้ ดังนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าตัวควบคุมที่ออกแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพกับทุกระบบ จึงควรมีการจำลองกับระบบไฟฟ้าที่ให้ขึ้น และนำไปทดสอบกับระบบไฟฟ้าจริง

สำหรับแนวทางในการพัฒนา คือ ควรมีการพัฒนาต่อยอดเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าให้มีฟังก์ชันการทำงานที่สามารถรองรับการทำงานของระบบไฟฟ้าได้ เช่น การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากรถยนต์ไฟฟ้าคืนสู่ระบบไฟฟ้า (V2G) หรือสามารถกำหนดค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรถยนต์ไฟฟ้าขณะอัดประจุเพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการใช้พลังงานไฟฟ้าและไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของโหลดอื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ปัญญา เข็มมุข. 2562. **“การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซล่าร์ฟาร์ม.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[2] Jampeethong P. and Khomfoi S., “Coordinated Control of Electric Vehicles and Renewable Energy Sources for Frequency Regulation in Microgrids,” **IEEE Access,** vol. 8, July. 2020, pp. 141967-141976.

[3] Matemate. **Smart Meter - Smart Grid เทคโนโลยี IOT เพื่อประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าที่ดีกว่าเดิม.** [Online]. Available : https://brandinside.asia/smart-meter-smart-grid-iot-technology/. 2561.

[4] กระทรวงพลังงาน. 2565. **คู่มือโครงการจัดทำแผนการพัฒนาสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อรองรับเป้าหมายการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศ**. กรุงเทพฯ : สำนักนโยบายพลังงานและแผนพลังงาน.

[5] คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. 2561. **คู่มือโครงการจัดทำแผนการพัฒนาสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อรองรับเป้าหมายการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศ**. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน.

[6] เจตนภัทร ไพรสุวรรณา. 2559. “เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์สำหรับยานพาหนะไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน CHAdeMO.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[7] Rabiee A., Soroudi A., Mohammadi-ivatloo B., and Parniani M.,“Corrective voltage control scheme considering demand response and stochastic wind power,” **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 29, no. 6, Nov. 2014, pp. 2965–2973.

[8] Munz U., Mesanovic A., Metzger M., and Wolfrum P., “Robust optimal dispatch, secondary, and primary reserve allocation for power systems with uncertain load and generation,” **IEEE Trans. Control Syst. Technol.,** vol. 26, no. 2, Mar. 2018, pp. 475–485.

[9] Doherty R. and O’Malley M., “A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity,” **IEEE Trans. Power Syst.,** vol. 20, no. 2, May 2005, pp. 587–595.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Rahbar K., Chai C.C., and Zhang R., "Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration," **IEEE Trans. Smart Grid,** vol. 9, no. 2, Mar. 2018, pp. 1482–1493.

[11] Zhang Y., Gatsis N., and Giannakis G.B., "Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables," **IEEE Trans. Sustain. Energy,** vol. 4, no. 4, Oct. 2013, pp. 944–953.

[12] Jie B., Tsuji T., and Uchida K., "Analysis and modelling regarding frequency regulation of power systems and power supply–demand-control based on penetration of renewable energy sources," **J. Eng.,** vol. 2017, no. 13, 2017, pp. 1824–1828.

[13] Kerdphol T., Rahman F. S., Mitani Y., Watanabe M., and Kufeoglu S., "Robust virtual inertia control of an islanded microgrid considering high penetration of renewable energy," **IEEE Access**, vol. 6, 2018, pp. 625–636.

[14] Kerdphol T., Rahman F. S., Watanabe M., Mitani Y., Turschner D., and Beck H.P., "Enhanced virtual inertia control based on derivative technique to emulate simultaneous inertia and damping properties for microgrid frequency regulation," **IEEE Access**, vol. 7, 2019, pp. 14422–14433.

[15] Liu S., Wang X., and Liu P. X., "Impact of communication delays on secondary frequency control in an islanded microgrid," **IEEE Trans. Ind. Electron.,** vol. 62, no. 4, Apr. 2015, pp. 2021–2031.

[16] Fathi A., Shafiee Q., and Bevrani H., "Robust frequency control of microgrids using an extended virtual synchronous generator," **IEEE Trans. Power Syst.,** vol. 33, no. 6, Nov. 2018, pp. 6289–6297.

[17] Magdy G., Shabib G., Elbaset A. A., Kerdphol T., Qudaih Y., Bevrani H., and Mitani Y., "Tustin's technique based digital decentralized load frequency control in a realistic multi power system considering wind farms and communications delays," **Ain Shams Eng. J.,** vol. 10, no. 2, Jun. 2019, pp. 327–341.

[18] Wu X., Shen C., and Iravani R., "A distributed, cooperative frequency and voltage control for microgrids," **IEEE Trans. Smart Grid**, vol. 9, no. 4, Jul. 2018, pp. 2764–2776.

[19] Li H., Wang X., and Xiao J., "Adaptive event-triggered load frequency control for interconnected microgrids by observer-based sliding mode control," **IEEE Access,** vol. 7, 2019, pp. 68271–68280.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] Zhao J., Lyu X., Fu Y., Hu X., and Li F., "Coordinated microgrid frequency regulation based on DFIG variable coefficient using virtual inertia and primary frequency control," **IEEE Trans. Energy Convers.,** vol. 31, no. 3, Sep. 2016, pp. 833–845.

[21] Ali H., Magdy G., Li B., Shabib G., Elbaset A. A., Xu D., and Mitani Y., "A new frequency control strategy in an islanded microgrid using virtual inertia control-based coefficient diagram method," **IEEE Access,** vol. 7, 2019 pp. 16979-16990.

[22] Latif A., Das D. C., Ranjan S., and Barik A. K., "Comparative performance evaluation of WCA-optimised non-integer controller employed with WPG–DSPG–PHEV based isolated two-area interconnected microgrid system," **IET Renew. Power Gener.,** vol. 13, no. 5, pp. 725–7

[23] Ranjan S., Das D. C., Latif A., and Sinha N., "LFC for autonomous hybrid micro grid system of 3 unequal renewable areas using mine blast algorithm," **Int. J. Renew. Energy Res. (IJRER),** vol. 8, no. 3, 2018, pp. 1297–1308.

[24] Latif A., Das D. C., Barik A. K., and Ranjan S., "Maiden coordinated load frequency control strategy for ST-AWEC-GEC-BDDG-based independent three-area interconnected microgrid system with the combined effect of diverse energy storage and DC link using BOA-optimised PFOID controller," **IET Renew. Power Gener.,** vol. 13, no. 14, Oct. 2019, pp. 2634–2646.

[25] Latif A., Das D. C., Barik A. K., and Ranjan S., "Illustration of demand response supported co-ordinated system performance evaluation of YSGA optimized dual stage PIFOD-(1+PI) controller employed with wind-tidal-biodiesel based independent two-area interconnected microgrid system," **IET Renew. Power Gener.,** vol. 14, no. 6, Apr. 2020. pp. 1074-1086.

[26] Jampeethong P. and Khomfoi S., "An EV Quick Charging Station Using a Pulse Frequency Current Control Technique," **12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2015),** Hua Hin, Thailand, June 2015.

[27] Jampeethong P. and Khomfoi S., "An EV Quick Charger Based on CHAdeMO Standard with Grid-support Function," **18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015),** Pattaya Thailand, 25-28 October 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] วิทวัตร ศรีสุ, ขวุฒินันท์ ผาโสม และ วุฒิพงษ์ แก่นโพธิ์. 2554. **“เครื่องอัดประจุโดยใช้เทคนิคการอัดประจุด้วยพัลส์ความถี่สำหรับประยุกต์ใช้ ในการฟื้นฟูแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสภาพ.”** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[29] Zhao Z., Yang P., Guerrero J. M., Xu Z., and Green T. C., “Multiple-Time-Scales hierarchical frequency stability control strategy of medium voltage isolated microgrid,” **IEEE Trans. Power Electron.,** vol. 31, no. 8, Aug. 2016, pp. 5974-5991.

[30] Anderson P. M. and Fouad A. A., 2008. **Power System Control and Stability**. Hoboken, NJ, USA: Wiley.

[31] Padhy B. P., Srivastava S. C., and Verma N. K., “A wide-area damping controller considering network input and output delays and packet drop,” **IEEE Trans. Power Syst.,** vol. 32, no. 1, Jan. 2017, pp. 166-176.

[32] Philipp L. D., Mahmood A., and Philipp B. L., “An improved refinable rational approximation to the ideal time delay,’” **IEEE Trans. Circuits Syst.I, Fundam. Theory Appl.,** vol. 46, no. 5, May 1999, pp. 637-640.

[33] Nagrath I., 2006. **Control Systems Engineering. Daryaganj**, New Delhi: New Age International.

[34] Liu C. H. and Hsu Y. Y., “Design of a self-tuning PI controller for a STATCOM using particle swarm optimization,” **IEEE Trans. Ind. Electron.,** vol. 57, no. 2, Feb. 2010, pp. 702-715.

[35] Juang C. F., and Lu C. F., “Load-frequency control by hybrid evolutionary fuzzy PI controller,” **IEE Proc.-Gener. Transmiss. Distrib.,** vol. 153, no. 2, 2006, pp. 196-204.

[36] Frederick D. K. and Chow J., 1999. **Feedback Control Problems Using MATLAB and the Control System Toolbox.** Seattle, WA, USA: Brooks/Cole Publishing.

[37] Krauss T. P., Shure L., and Little J., 1994. **Signal Processing Toolbox for Use With MATLAB: User’s Guide.** Natick, MA, USA: MathWorks.

[38] Coleman T., Branch M. A., and Grace A., 1999. **“Optimization toolbox,” in For Use With MATLAB. User’s Guide for MATLAB Version 2**, Relaese II, vol. 5. Natick, MA, USA: MathWorks.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[39] Liu M., Dassios I., Tzounas G., and Milano F., “Stability analysis of power systems with inclusion of realistic-modeling WAMS delays,” **IEEE Trans. Power Syst.,** vol. 34, no. 1, Jan. 2019, pp. 627-636.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

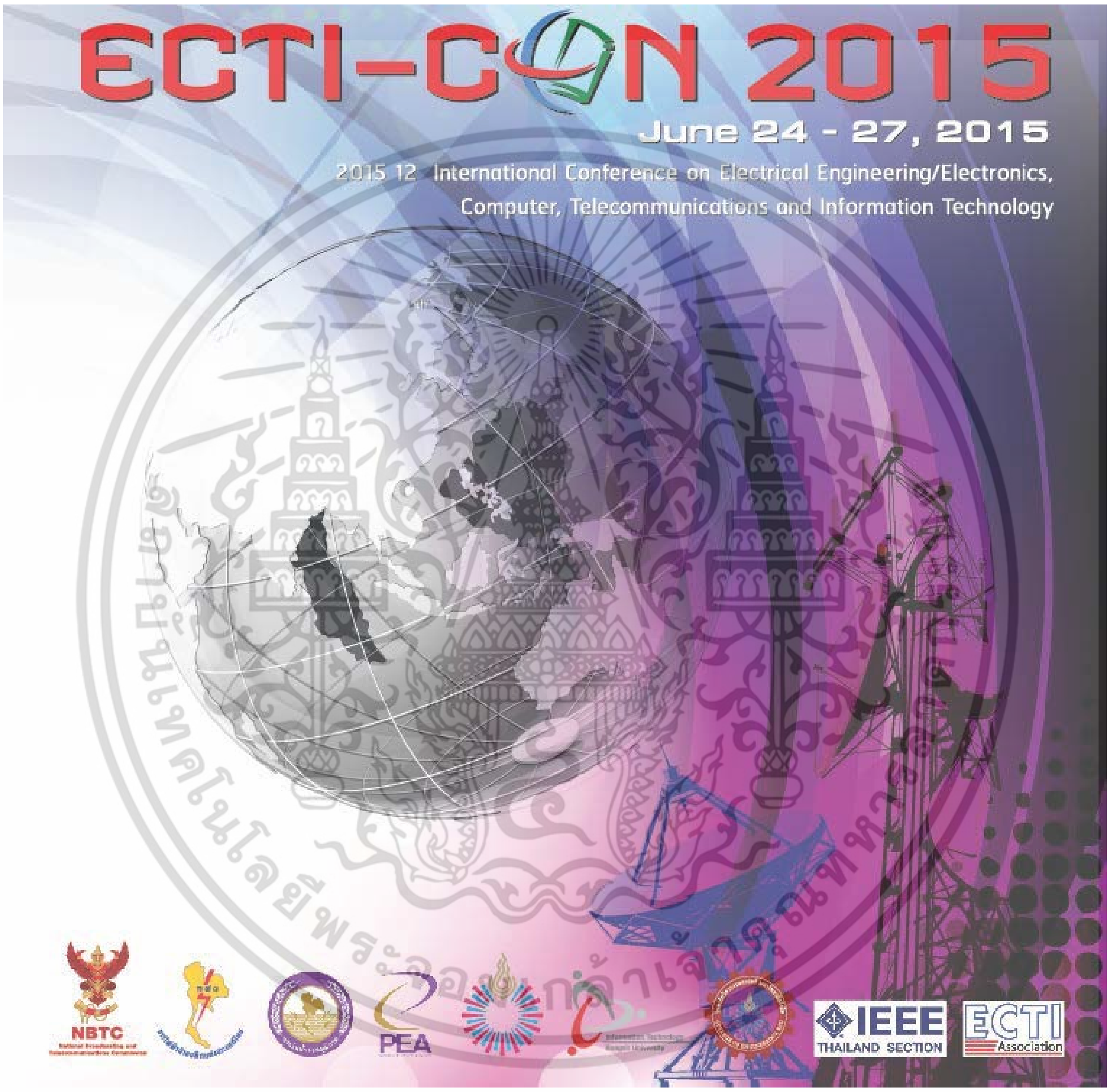
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

[1] Jampeethong P. and Khomfoi S., “An EV Quick Charging Station Using a Pulse Frequency Current Control Technique,” **12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2015),** Hua Hin, Thailand, June 2015.

[2] Jampeethong P. and Khomfoi S., “An EV Quick Charger Based on CHAdeMO Standard with Grid-support Function,” **18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015),** Pattaya Thailand, 25-28 October 2015.

[3] Jampeethong P. and Khomfoi S., “Coordinated Control of Electric Vehicles and Renewable Energy Sources for Frequency Regulation in Microgrids,” **IEEE Access,** vol. 8, pp. 141967–141976, 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An EV Quick Charging Station Using a Pulse Frequency Current Control Technique

Phoompat Jampeethong
Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
Poompat_@hotmail.com

Surin Khomfoi
Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
kkhsurin@kmitl.ac.th

***Abstract*— An electric vehicle (EV) quick charging station using pulse frequency current control technique is developed in this paper. The current source modular converter configuration is used to perform the charging pulses with both positive and negative pulse to achieve time required for an EV which is less than 30 minutes. The positive pulse charge permits the high peak current charge: this will lead to quick charging mode; whereas, the idle state can control battery temperature rise. The frequency used for pulse charge technique can be varied depending on the type and condition of a battery. The use of current source converter can offer the inherit fault tolerance capability and bidirectional power flow. PSIM 9.0.3 is utilized for simulation study and the 50 kW prototype is developed to validate the proposed notion. The simulation and experimental results illustrate that the proposed pulse frequency charging technique requires about 16 minutes to fully charge battery from 20% of SOC at 80% of SOC. The temperature rise of pulse frequency charging technique is less than 4 °C:these can lead to quicker charge and longer battery lifetime. The results suggest that the proposed technique can be applied for an electric vehicle quick charger station.**

Keywords*— *quick charging; electric vehicle; pulse charge; SOC

I. Introduction

Recently, electric vehicles (EVs) have grown rapidly as demanded green energy form the world. More specially, in a large city, air pollution due to CO_2 emission is a concerned issue. For instance, Nissan LEAF sales have officially surpassed 100,000 units worldwide in January 2014 capturing about 45% market share of EV business. Also, the battery technology for EVs is developed to be a high rate charge and discharge. Therefore, higher number of EVs will be used in the next few years. It is expected that more than 5 million EVs will be utilized by 2020 [1]. Generally, EVs can run for about 150 km; therefore, a charging station is required which has a function like a gas station. There are three important issues for a charging station: quick charge (less than 30 minutes), long battery lifetime (low temperature rise during charge), and standardization (every vehicle providers can be used).

Constant current (CC) and constant voltage (CV) method is normally used for a battery charger. CC provides shorter time for charging a battery with higher temperature rise; whereas, CV offers low temperature rise with longer charging time. With the limit of voltage per cell (V/cell) and maximum charging current (I_{max}) from battery providers, CC and CV method cannot meet the 30 minutes charging time and low temperature rise requirements from EV users. Thereupon, a pulse charging method is an alternative technique for a quick charger at high current. A pulse charge method can be injected higher peak voltage and current with the same of V/cell and I_{max} rated; therefore, a charging time is shorter comparing to CC and CV method [2].

There are some previous researches using pulse charge technique for a charger application. The hybrid method between regenerative pulse and equalization charger using a DSP has been developed in [3]. The proposed technique used high switching frequency for charging operation which provided low ripple current but higher switching losses in power devices: this might lead to high temperature rise. A flyback converter with positive and negative pulse charger with power factor correction has been introduced in [4]. The results in [4] offered a good power factor and bidirectional power flow; however, the temperature rise of the battery did not discuss in the research. Designs of battery pulse charge with varying frequency and duty cycles have been proposed in [5-6]. The proposed method has been designed for a small Li-Ion battery and could be applied for an EV battery. However, the temperature rise and the effect of frequency and duty cycle of pulse signal did not investigate. In addition, a review of charging algorithm for Nickel and Lithium battery charger has been performed in [7]. The methods discussed in [7] are investigated mostly a small size applications for mobile phones, laptop computer, tablet PC, etc. One can see that a few researches have been done for a pulse quick charge technique for an EV.

Therefore, a pulse frequency technique of a quick charger is proposed in this research. Suitable duty cycles and frequencies of positive and negative pulses are investigated for a particular EV battery.

Fig. 1. Quick charging station for EVs.

978-1-4799-7961-5/15/$31.00 ©2015 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Duty cycle and switching frequency of the developed paradigm can be controlled to meet the quick charge and longer battery lifetime with different type of batteries. The proposed circuit diagram is an improved version from [8] which can operate in bidirectional power flow via using a current source converter for better fault tolerance capability. PSIM 9.0.3 is utilized for simulation study and the 50 kW prototype is developed to validate the proposed notion. The possible quick charger station is shown in Fig.. 1. A possible application of this proposed method can be used as a charging station for an EV as proposed in [9]. A set of photovoltaic cells can also be integrated with a charging station for better energy efficacy.

II. Proposed Control Paradigm

To represent a battery electrochemical action, the ac-impedance method is normally used as clearly explained in [7-8] and will not repeat here. Briefly, a charge transfer resistance in a battery represents to interfacial electrochemical impedance and this resistance is reciprocal to exchange current density (i_o) and the exchange current density can be written by

$$i_o = Fk_0(1-\theta)^{1-\alpha}\theta^{\alpha}c^{1-\alpha} \quad (1)$$

where,

F	=	the Faraday constant (96487 C/equiv),
k_o	=	the standard rate constant for heterogeneous reaction,
θ	=	the mole fraction,
α	=	the transfer coefficient ,
c	=	the concentration at the surface of the electrode.

As can be seen, in (1) the parameter c can be changed by a charging method as explained in [7].

The pulse frequency can be generated from a modulation between desired positive pulse and negative pulses and a triangle waveform. The positive and negative pulse width can be controlled depending on the battery conditions (V/cell and I_{max}) and battery temperature rise (ΔT^o). The temperature rise during charge can effect a battery lifetime as depicted in Fig. 2. Clearly, if a temperature increases about 5 °C from 25 °C , a lift time is expected to decrease about 30% in lead acid and about 10% of lithium battery. A circuit operation incorporating with related pulse width signals is illustrated in Fig. 3. The positive pulse width is depended upon V/cell; whereas, the idle state is referred with battery temperature rise. If the battery temperature rise is higher than 4 C° the idle state interval will increase to control the battery temperature as depicted in Fig. 4. Fig. 4 also shows a flow chart diagram of proposed quick charging paradigm. As can be seen, temperature rise control is used during constant voltage charging mode: this would not cost battery lifetime.

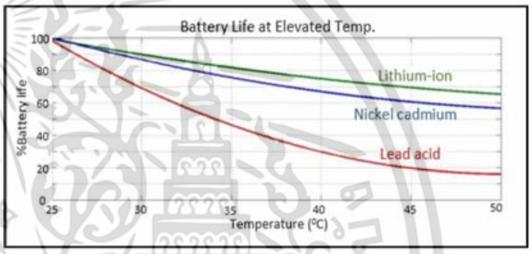


Fig. 2. The temperature rise during charge can effect a battery lifetime.

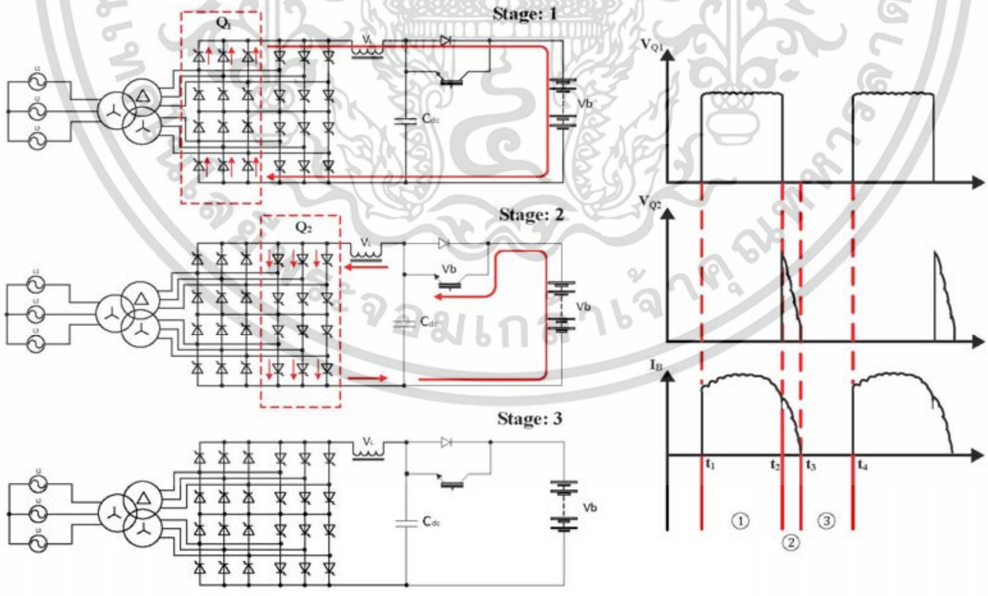


Fig. 3. Proposed Circuit operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PSIM 9.0.3 is used to simulate the notion of the proposed system as illustrated in Fig. 5. Gate drive signals are generated using pulse width modulation (PWM). There are two reference signals: positive pulse (d^+) and idle state pulse (d^-). Positive and idle state are independently control. As previously mentioned, positive pulse width (d^+) is depended on voltage per cell (*V/cell*)

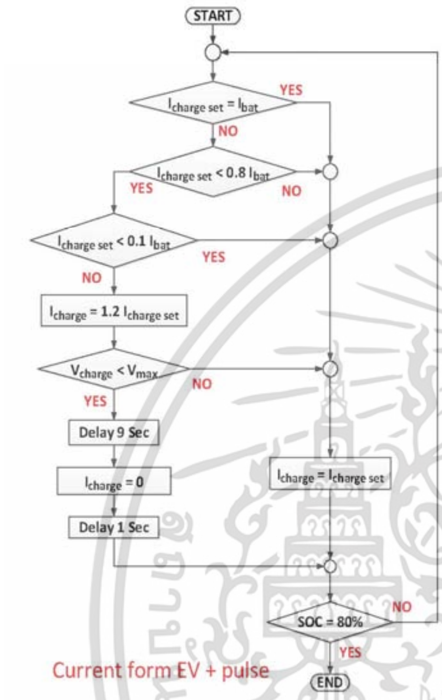


Fig. 4. Proposed control paradigm

and maximum charging current (I_{max}) of battery. Idle state pulse width (d^-) is used to control temperature rise of a battery during charging process ($\Delta T°$). Both positive and idle pulses at 50 Hz frequency are modulated with a triangle waveform at 5 kHz. For a particular study, d^+ = 0.5 and d^- = 0.08 are used. All gate drive signals and modulation signals are depicted in Fig.. 4. The simulation results are shown in Fig.. 6. As can be seen, battery charging voltage and charging/discharging current are pulse frequency signals and can be controlled V/cell and I_{max} by adjusting d^+ and d^-. As can be seen, the circuit is based on simple buck-boost converter with bidirectional power flow function. Also, a control algorithm is also simple and possible to implement in a single chip.

III. Experimental Results

The developed 50 kW prototype of a quick charger using pulse frequency technique is shown in Fig. 7. Nisan LEAF 2012 was used to validate the charging time of the developed charger. The LEAF has 24 kWh laminated lithium ion battery and requires 30 minutes at 50 kW charging time for a quick charge mode. The developed current source converter can performed both conventional CC/CV charging mode and pulse frequency charging mode. The developed charger is communicated with the Nissan LEAF via CHAdeMO standard. The suitable frequency and duty cycle (d^+) were investigated for this particular battery as shown in Table I. Obviously, 0.75 duty cycle of positive pulse with 25 Hz frequency was selected as a reference signal to modulate with a triangle for generating pulse frequency because they provided less charging time and lowest temperature rise. The selected duty cycle and frequency are selected based on battery measured parameters from the tested Nissan LEAF. The optimal duty cycle for pulse charging technique can be calculated based on charging efficiency and exchange current density as developed by [7-8]. It should be noted that different batteries (types and providers) would have different battery parameters.

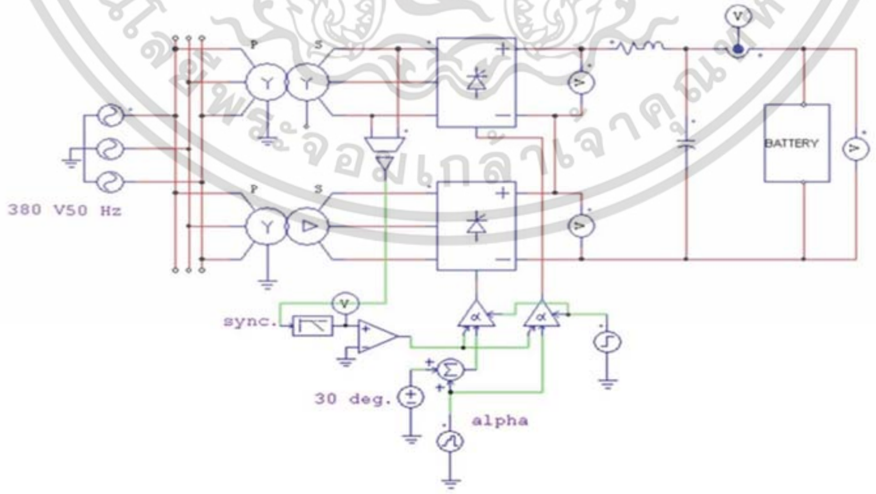


Fig. 5. Simulation model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The developed prototype was also performed conventional CC and CV experiment to compare with the pulse frequency charging mode. Fig. 8. and Fig. 9. are experimental results of battery charging and discharging using CC and CV technique; whereas, Fig.. 10 and Fig.. 11 are the experimental results using the proposed pulse frequency technique. The LEAF was validated at a same circumstance. The LEAF was charged from 20% of SOC to 80% of SOC in quick charging mode. As can be seen, the terminal voltage were regulated for both charging methods. The charging process was performed until the tested battery was fully charged.

TABLE I
SUITABLE REFERENCE SIGNAL PARAMETER FOR BATTERY UNDER TEST

Frequency at 50Hz		d^+ at 0.75	
Variable d^+		Variable Frequency	
d^+	Charging time (minute)	Frequency	ΔT (°C)
0.5	325	25	3.275
0.75	250	50	3.575
		100	3.875
		200	3.650

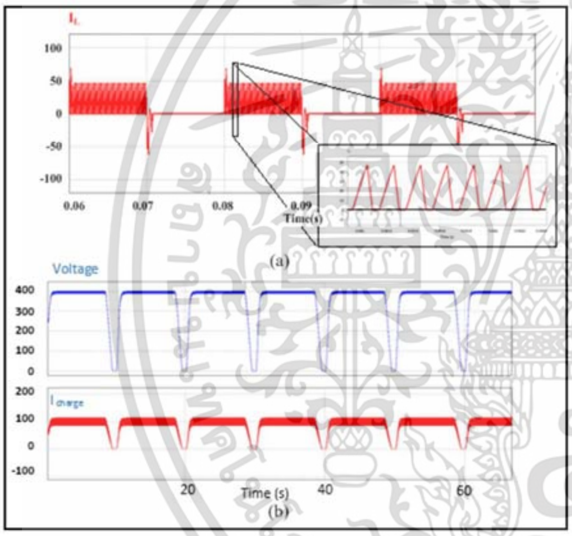


Fig. 6. Simulation results: (a) an inductor current (b) charging voltage and current of a battery.

Fig. 7. A pulse frequency 50 kW charger prototype

The terminal voltage were regulated at 400 V and maximum charging current (I_{max}) was limited at 120 A as shown from Fig. 8 to Fig. 11. Fig. 8 shows the results of conventional CC/CV charging mode. As known, the CC will perform first then the CV mode will operate to keep temperature rise. The charging time required is about 20 min. It should be noted that EVs will control the charging process via CHAdeMO using CAN bus communication. Fig. 9 also shows the magnified view of terminal voltage and current. After that, the pulse frequency charging mode results are illustrated in Fig. 10 and 11. As can be seen, the pulse frequency charge will perform during constant voltage region which is not over the current limitation. The results show that the required charging time is about 16 min. The temperature investigation both at the battery and developed charger were also observed as shown in Fig. 12. In addition, Fig. 10 shows the comparison results of charging performance between conventional CC/CV charging method and proposed pulse frequency technique. Clearly, the proposed pulse frequency technique can change the test batteries from 20 percent of state of charge (SOC) to 80% of SOC quicker than conventional CC/CV method about four min. Moreover, the temperature rise of proposed charging technique is less than a CC/CV method about 1 °C. One can see that the proposed technique can perform better charging performance in term of charging time and temperature rise. The experimental results illustrate that the proposed pulse frequency technique is a promising technique to apply for a quick charger in EVs.

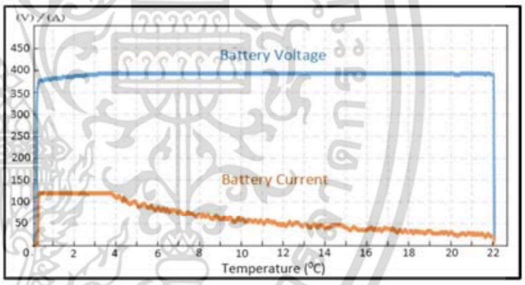


Fig. 8. Voltage and current signals of the tested battery set using Conventional CC/CV method.

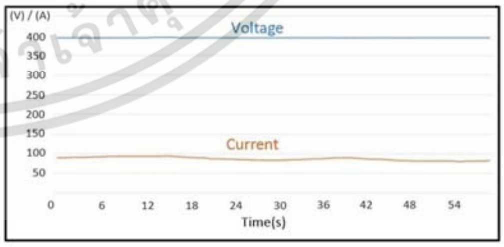


Fig. 9. Magnified view of terminal voltage, current and temperature of the tested battery set using conventional CC/CV method.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

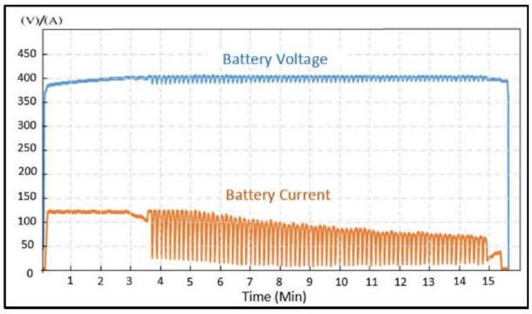


Fig. 10. Voltage and current signals of the tested battery set using proposed pulse frequency technique

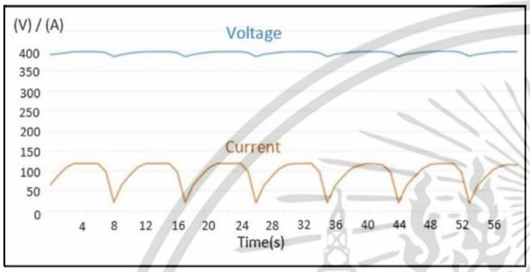


Fig. 11. Magnified view of terminal voltage, current and temperature of the tested battery set using proposed pulse frequency technique.

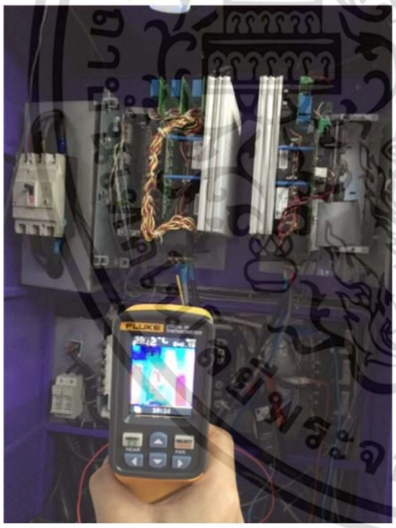


Fig. 12. Temperature rise investigation at the proposed converter.

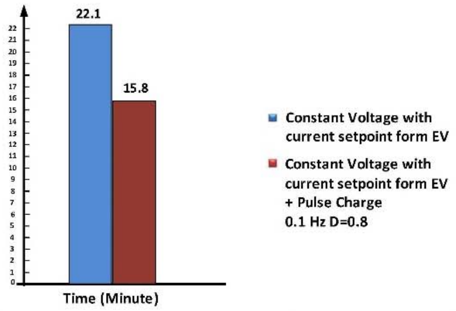


Fig. 13. Comparison results of charging performance between a CC/CV and the proposed technique at SOC 20%.

IV. CONCLUSIONS

A pulse frequency technique of a quick charger has been developed in this paper. Pulse frequency charging technique can offer quicker battery charger comparing to conventional CC/CV technique about 4 minutes and lower temperature rise about 1 C^{O}. A simulation study has also been performed to evaluate circuit operation and control paradigm. The suitable reference signal parameters for the battery under test have also been investigated. The proposed pulse frequency charging technique has been performed under Nissan LEAF model 2012. The experimental results also imply that this pulse frequency charging technique can also be applied with other types of EV batteries. An EV battery pack normally consists of several single battery cells; therefore, it is possible to apply this pulse frequency technique in EV charger with carefully battery management. Although a cost of a bidirectional power flow converter will increase for a pulse frequency charger, the extra performance for quicker charging time and low temperature rise during charging process are required for an EV charging station.

References

[1] Zhipeng Liu, Fushuan Wen, and Gerard Ledwich, "Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp 102 – 110, January 2013.

[2] T. J. Liang, T. Wen, K. C. Tseng, and J. E Chen, "Implementation of a Regenerative Pulse Charger Using Hybrid Buck-Boost Converter," *IEEE Power Electronics and Drive Systems*, 2001, pp 437 – 442.

[3] Chih-Chiang Hua, Ching-Hsiang Hsu, "Implementation of a Regenerative Pulse and Equalization Battery Charger Using a DSP," *IEEE Power Electronics and Drive Systems*, 2005, pp 955 -959.

[4] K. C. Tseng, T. J. Liang, J. E Chen, and M. T. Chang, "High Frequency Positive/Negative Pulse Charger with Power Factor Correction," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2002, pp 671 – 675.

[5] Liang-Rui Chen, "A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Varied Technique," *IEEE Transactions on Industrial Elactronics*, vol. 54 no. 1, pp 398 -405, February 2007.

[6] Liang-Rui Chen, "Design of Duty-Varied Voltage Pulse Charger for Improving Li-Ion Battery-Charging Response," *IEEE Transactions on Industrial Elactronics*, vol. 56 no. 2, pp 480 -487, February 2009.

[7] Hussein, H.A.-H., Batarseh, I. "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers" , *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60 no. 3, March 2011, pp 1 – 6.

[8] C.Praisuwanna, S.Khomfoi,"A Quick Charger Station for EVs Using Pulse Frequency Technique,"*Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2013, pp3595– 3599.

[9] O. Veneri, L. Ferraro, C. Capasso, D. Iannuzzi, "Charging Infrastructures for EV: Overview of Technologies and Issues," *IEEE Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2012, 1 –6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)

Pattaya, Thailand
25-28 October 2015

Pages 1-721

IEEE Catalog Number: CFP15801-POD
ISBN: 978-1-4799-8806-8

1/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 25-28, 2015, Pattaya City, Thailand

An EV Quick Charger Based on CHAdeMO Standard with Grid-support Function

P. Jampeethong, S. Khomfoi
Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
E-mail: poompat_@hotmail.com, kkhsurin@kmitl.ac.th

***Abstract* — An electric vehicle (EV) quick charger based on CHAdeMO standard with grid-support function is proposed in this paper. The current source modular converter configuration is used to perform the charging pulses with both positive and negative pulse to achieve required time for an EV which is less than 30 minutes. The use of current source converter can offer the inherit fault tolerance capability and bidirectional power flow. CHAdeMO protocol is modified for grid-support function. The 50 kW prototype is developed to validate the proposed notion. The simulation and experimental results illustrate that the proposed pulse frequency charging technique requires about 16 minutes to fully charge of the battery from 20% of SOC to 80% of SOC. The results suggest that the proposed technique can be applied for an electric vehicle quick charger station.**

I. Introduction

Recently, electric vehicles (EVs) have grown rapidly as demanded green energy form the world. More specially, in a large city, air pollution due to CO_2 emission is a concerned issue. For instance, Nissan LEAFs in June 2015, have a sales over 180,000 units since December 2010 which is abount 45% of worldwide market share in EV business. Therefore, higher number of EVs will be used in the next few years. It is expected that more than 5 million EVs will be utilized by 2020 [1].As can be seen , A quick charge operating as a gas station is required.There are three important issues for a charging station: quick charge (less than 30 minutes), long battery lifetime (low temperature rise during charge), and standardization (every EV provider can be used). Constant current (CC) and constant voltage (CV) method cannot meet the 30 minutes charging time and low temperature rise requirements from EV users. Thereupon, a pulse charging method is an alternative technique for a quick charger at high current. A pulse charge method can be injected higher peak voltage and current with the same of V/cell and I_{max} rated; therefore, a charging time is shorter comparing to CC and CV method [2]. There are some previous researches using pulse charge technique for a charger application. The hybrid method between regenerative pulse and equalization charger using a DSP has been developed in [3-4]. The experiments in [4] provided a good power factor and bidirectional power flow; however, the temperature rise of the battery did not discuss in the paper. Designs of battery pulse charge with varying frequency and duty cycles have been proposed in [5-6]. The developed technique has been applied for a small Li-Ion battery and could be applied for an EV battery. However, the temperature rise and the effect of frequency and duty cycle of pulse signal did not investigate. In addition, a review of charging algorithm for Nickel and Lithium battery charger has been performed in [7]. The methods discussed in [7] are also investigated mostly a small size applications for mobile phones, laptop computer, tablet PC, etc. One can see that a few researches have been reported for a pulse quick charge technique for EV applications. That is why, the EV quick charger station acting as a gas station with grid-support function is developed in this research.

One of possible charger stations can be illustrated in Fig. 1 which contains photovoltaic roof (PV), battery energy storage (BES) and a quick charger. The developed charger station can act as a microgrid; so, the station can manage the energy flow in a microgrid by controlling tie-line power flow at point of common coupling (PCC). PV roof can supply energy to a charger and also to a BES depending on the mode of operations. If there have a demand from a quick charger, the inverter will supply PV energy to the charger; whereas, the PV energy will charge a BES if there have no demand. If the there are not a demand and BES is fully charged, the inverter will not feed energy back to the grid. It can be noted that the proposed charger station is drawn energy from PV and BES in first priority; then, the station will draw energy from the utility grid if the required energy is not adequate. Additionally, the proposed charger station can reduce an impact to the grid due to high charging current and avoid a new distribution transformer.

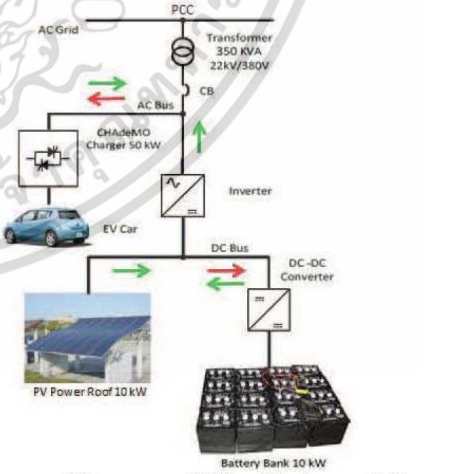


Fig.1 Diagram of the proposed EV quick charger station.

978-1-4799-8805-1/15/$31.00 ©2015 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

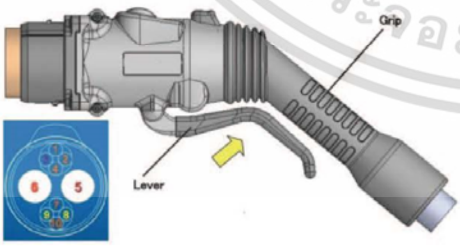
2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 25-28, 2015, Pattaya City, Thailand

A standard of EV quick charger known as CHAdeMO [8] is widely used. CHAdeMO is a quick charging method (trade name) for battery EV rating up to 62.5 kW of high voltage dc current via a particular connector and protocol. Also, CHAdeMO is a global association proposing CHAdeMO standard which is firstly introduced in Japan since 2009 to be a global industry standard. Right now, more than 8,000 quick chargers have been installed around the world using CHAdeMO protocol in 38 countries. CHAdeMO also allows bidirectional power flow charging; therefore, vehicle to grid (V2G) and vehicle to home (V2H) are possible to implement for supporting smart grid in the future.

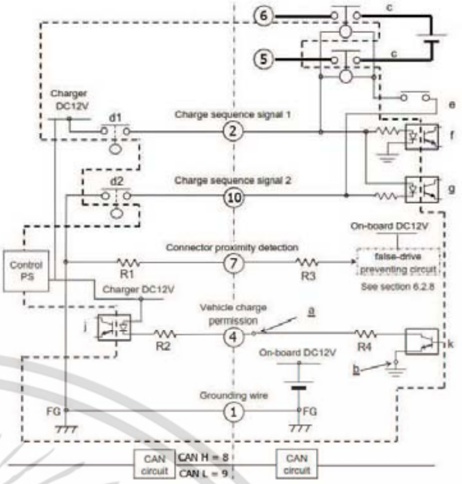
Thereupon, the proposed quick charger based on CHAdeMO with grid-support function is presented in this paper. The paper is organized into five sections: first, the introduction will be presented for the overview and review of previous works. Then, the timing diagram in a controller area network (CAN bus) according CHAdeMO protocol will be described. After that, Circuit topology and simulation study will be explained. Next, the experimental result will be validated. Finally, results and important remarks will be concluded.

II. Timing Diagram of CHAdeMO Protocol

The CHAdeMO standard contains two important parts which are a connector and protocol. For safety reasons, EV maker requires a specific connector for high dc current charger as depicted in Fig. 2. As can be seen, the holder is connected with the quick charger and a receiver is installed in an EV. The wiring diagram of connector is illustrated in Fig. 2 (b). This wiring diagram consists of power line for high current and also communication wires for CAN bus interfacing with an EV. A power line is a path of high current for charging the battery in a EV which controls and monitors via CAN bus (CAN 2.0B) based on ISO 11898 format transmission with 500 kbps transmission cycle of 100 msec ± 10%. It should be noted that the EV will provide all charging or discharging command to a quick charger; therefore, it is important to understand the timing diagram of an EV via communicating with CAN bus which is required by CHAdeMO protocol [8].



(a)



(b)

Fig. 2. Connector of CHAdeMO standard showing (a) holder and connector [8], (b) wiring diagram [8]

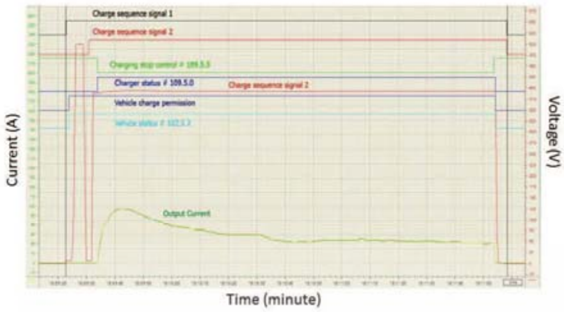
The timing diagram of CHAdeMO protocol is shown in Fig. 3. Each state of a diagram will communicate between an EV and Charger via Hexadecimal indicator as ID numbers. The communication wires include five pins with difference colors for sequential controlled signals (Pin # 1,2,4,7 and 10) and two pins (Pin # 8 and 9) for CAN bus. More detail can be reached in [8]. The sequential state of communication as shown in Fig. 3 (a) can be briefly explained as follows:

- Charging sequence signal 1 is a signal handshake from a charger sending to an EV,
- Charging sequence signal 2 is a confirmed signal from a charger to an EV after the connection is completed,
- Charging stop control is a data of operating status of a charger for showing operation in progress or stop operation,
- Charging status is a data for indicating charger status that can be operated or not (ready or not ready),
- Vehicle charging permission is a signal for permission from an EV for charging mode and indicates the relay status,
- Vehicle charging enable is a data for indicating communication status,
- Vehicle status is a data for showing an EV status.

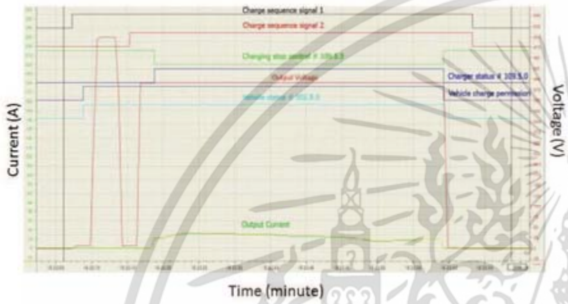
In addition, an EV will be required to check a short circuit and ground fault. A quick charger will supply dc voltage about 10 V for checking the contractor which is connected with battery terminals. The contractor needs to be turn-off or open circuit. Then, A quick charger will supply a test dc voltage about 500 V for checking insulation status. The resistance of 100 kΩ is a threshold value between positive and negative bus of an EV battery. The graphical of short circuit and insulation validation is illustrated in Fig. 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 25-28, 2015, Pattaya City, Thailand



(a)



(b)

Fig. 3. Timing diagram operation of CHAdeMO showing (a) sequential signals, and (b) short circuit and insulation test status.

III. Proposed Circuit Operation

A. Circuit Topology

The proposed circuit diagram incorporating with related pulse width signals is shown in Fig. 4. The modified current source converter is applied using positive and negative thyristor based converter known as PN converter. The modified PN converter can operate in bidirectional power flow and provide better fault tolerance capability. Therefore, V2G and V2H smart grid function is achievable for using the proposed converter; however, this proposed converter has bigger size comparing to a switching mode power supply because the proposed converter required a interfacing transformer for better input current quality and galvanic isolation. It should be noted that the ground isolation is needed for an EV charging station based on CHAdeMO recommendations. The IGBT is used for providing bidirectional power flow during pulse charging operation which is key contribution in this paper. The turn-on time of IGBT is depended up on the battery condition. The pulse width and idle state can be controlled depending on the battery conditions (V/cell and I_{max}) and battery temperature rise (ΔT^{o}). The temperature rise during charge can effect a battery lifetime. There are three states of the proposed circuit operation as depicted in Fig. 4: charging mode, discharging mode, and idle mode. Charging mode will operate Q_1 converter for desired current and voltage command from an EV via CAN bus and CHAdeMO protocol; whereas, the discharging mode will operate Q_2 converter and turning on an IGBT for releasing energy back to the grid for performing pulse charging technique as reported in [9]. The idle mode will operate during resting time if the temperature of the battery is increasing over than threshold value which is 5 ^{o}C for Nissan LEAF case. The CHAdeMO will send all data status from an EV to the quick charger via CAN bus. The output voltage at battery terminals and related current during each operating mode of the proposed modified PN converter is illustrated in Fig. 5.

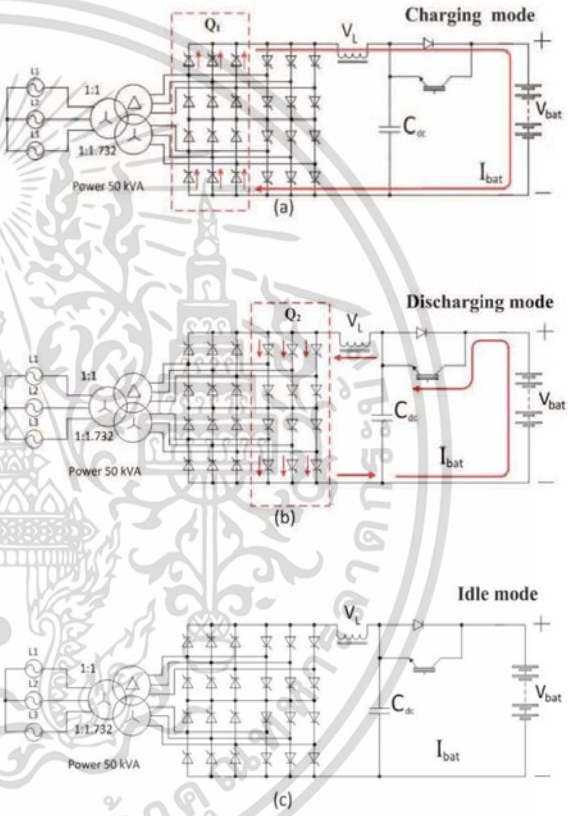


Fig. 4. Circuit topology showing (a) charging mode, (b) discharging mode, and (c) idle mode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

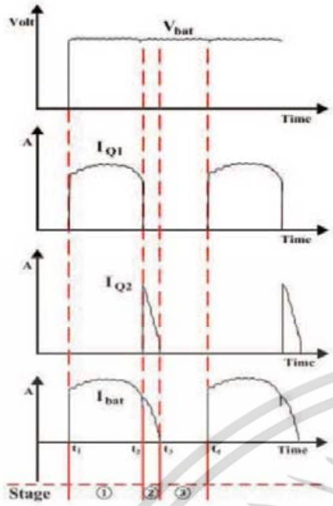


Fig. 5. Output voltage at battery terminals and related current in each operating mode.

Fig. 6 also shows a flow chart diagram of proposed quick charging paradigm. As can be seen, temperature rise control is used during idle mode: this would not cost battery lifetime. The positive pulse width is depended upon V/cell; whereas, the idle state is referred with battery temperature rise. The pulse frequency can be generated from a modulation between desired positive pulse and negative pulses and a triangle waveform. The positive and negative pulse width can be controlled depending on the battery conditions (V/cell and I_{max}) and battery temperature rise (ΔT^o).

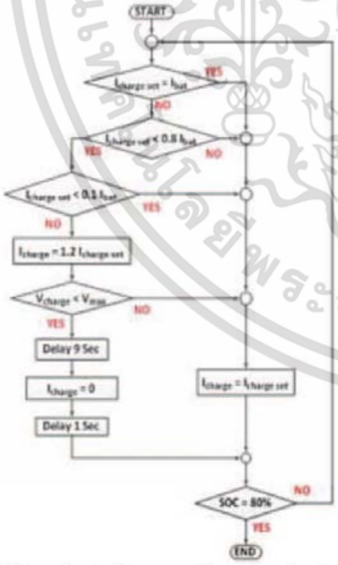


Fig. 6. Flow chart diagram of proposed quick charging technique.

B. Simulation study

PSIM 9.0.3 is used to simulate the notion of the proposed system as illustrated in Fig.7. The modified PN converter is used to perform a quick charging mode via control output voltage at battery terminal and charging current flowing to a battery as shown in Fig. 8. As can be seen, the fine output voltage and charging current were achieved; also, the actual charging current and current commands were in good agreement. The simulation results suggest that it is possible to use the modified PN converter for a quick charging in an EV application.

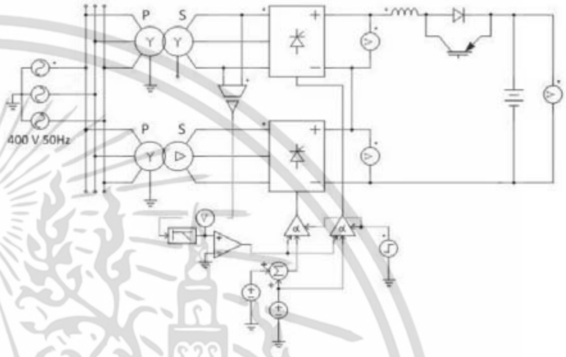


Fig. 7. Simulation model.

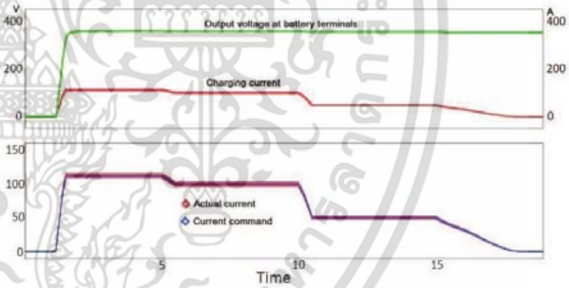


Fig. 8. output voltage at battery terminal and charging current flowing to a battery

IV. EXPERIMENTAL VALIDATION

The developed 50 kW prototype of a quick charger using pulse charging technique is shown in Fig. 9. The EV from Nissan known as LEAF model 2012 was used to validate the charging time of the developed charger. The LEAF has 24 kWh laminated lithium ion battery and requires 30 minutes at 50 kW charging time for a quick charge mode. The proposed modified converter can performed both conventional CC/CV charging mode and pulse frequency charging mode. The technical specification of the proposed quick charger is listed in Table I.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 9. Experimental setup.

TABLE I.
TECHNICAL SPECIFICATION

System Type	Single DC fast-charging station
Environment	Indoor / outdoor
Input	
AC Power Connection	3P+PE
Input voltage range	400 Vac +/- 10%
Nominal input voltage	400 Vac
Nominal input Current	70 A
Nominal input power	50 kVA
Nominal input frequency	50 Hz
Output for Car	
Maximum output power	50 Kw
Maximum output current	120 A
Output voltage	50-500 V
Output for EBike	
Maximum output power	900 w
Maximum output current	15 A
Output voltage	10- 60 V
General	
DC connection standard	CHAdeMO compliant
DC cable length	3 m
DC plug type	JEVS G105
RFID system	13.56MHz, ISO 14443A

The developed prototype was also performed conventional CC and CV experiment to compare with the pulse charging mode. Fig. 10 shows experimental results of battery charging and discharging using CC and CV technique; whereas, Fig. 11 illustrates the experimental results using the proposed pulse charging technique. The LEAF was validated at a same circumstance. The LEAF was charged from 20% of SOC to 80% of SOC in both quick charging modes. As can be seen, the terminal voltage was regulated for both charging methods. The charging process was performed until the LEAF was fully charged. The battery terminal voltage were regulated at 400 V and maximum charging current (I_{max}) was limited at 120 A as shown from Fig. 10 and Fig. 11.

Fig. 10 illustrates the results of conventional CC/CV charging mode. As known, the CC will perform first then the CV mode will operate to keep temperature rise. The charging time required is about 22 min. It should be noted that EVs will control the charging process via CHAdeMO using CAN bus communication. Meanwhile, the pulse charging mode results are illustrated in Figure 11. Clearly, the pulse charging mode will perform during constant voltage region which is not over the current limitation. The results illustrate that the required charging time is about 15 min. Additionally, the temperature rise of a proposed pulse charging technique was about 3.92 °C ;whereas, the temperature rise was 4.13 °C for CC/CV method. The energy consumption of CC/CV was about 9.7 kWh; whereas, the pulse charging was about 9.3 kWh for energy consumption.

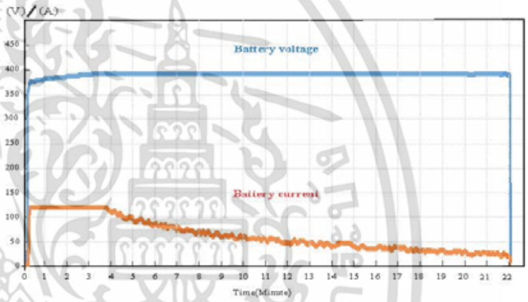


Fig. 10. Voltage at battery terminals and charging current operating in CC/CV charging mode.

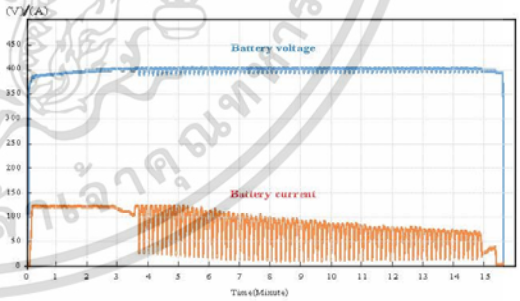


Fig. 11. Voltage at battery terminals and charging current operating in proposed pulse charging mode.

The comparison of experimental results between CC/CV method and pulse charge method is shown in Fig. 12. Clearly, the proposed pulse technique can change the test batteries from

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20% of state of charge (SOC) to 80% of SOC quicker than conventional CC/CV method about seven min. Moreover, the temperature rise of proposed charging technique is less than a CC/CV method about 1 °C. Furthermore, both charging techniques are consumed almost a same level of energy. The results show the proposed technique can perform better charging performance in term of charging time and temperature rise. The experimental results suggest that the proposed pulse technique and modified PN converter are a promising technique to apply for a quick charger for EVs.

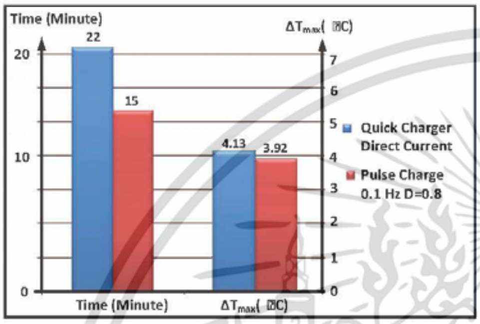


Fig. 12. Comparison of experimental results between CC/CV method and pulse charging method.

V. Conclusion

An electric vehicle (EV) quick charger based on CHAdeMO standard with grid-support function has been proposed. The modified PN converter has been applied to perform the charging pulses with both positive and negative pulse to achieve time required for an EV which should be less than 30 minutes. CHAdeMO protocol has been explained for providing grid-support function. The proposed CHAdeMO modification can allow the EV to perform grid- support function. The experimental validation has also been validated comparing to CC/CV charging mode. The proposed pulse technique can change the test batteries from 20% of state of charge (SOC) to 80% of SOC quicker than conventional CC/CV method about seven min. Moreover, the temperature rise of proposed charging technique is less than a CC/CV method about 1 °C. Furthermore, both charging techniques are consumed almost a same level of energy. The experimental results illustrate that the proposed pulse technique and modified PN converter are a promising technique to apply for a quick charger for EVs.

Acknowledgment

This work is supported by PEA and EPPO research fund

References

[1] Zhipeng Liu, Fushuan Wen, and Gerard Ledwich, "Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp 102 – 110, January 2013.

[2] T. J. Liang, T. Wen, K. C. Tseng, and J. E Chen, "Implementation of a Regenerative Pulse Charger Using Hybrid Buck-Boost Converter," *IEEE Power Electronics and Drive Systems*, 2001, pp 437 – 442.

[3] Chih-Chiang Hua, Ching-Hsiang Hsu, "Implementation of a Regenerative Pulse and Equalization Battery Charger Using a DSP," *IEEE Power Electronics and Drive Systems*, 2005, pp 955 -959.

[4] K. C. Tseng, T. J. Liang, J. E Chen, and M. T. Chang, "High Frequency Positive/Negative Pulse Charger with Power Factor Correction," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2002, pp 671 – 675.

[5] Liang-Rui Chen, "A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Varied Technique," *IEEE Transactions on Industrial Elactronics*, vol. 54 no. 1, pp 398 -405, February 2007.

[6] Liang-Rui Chen, "Design of Duty-Varied Voltage Pulse Charger for Improving Li-Ion Battery-Charging Response," *IEEE Transactions on Industrial Elactronics*, vol. 56 no. 2, pp 480 -487, February 2009.

[7] Hussein, H.A.-H., Batarseh, I. "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers" , *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60 no. 3, +March 2011, pp 1 – 6.

[8] http://www.chademo.com/wp/activities

[9] P. Janmpeethong, S. Khomfoi, "An EV Quick Charging Station Using a Pulse Frequency Current Control Technique," ECTI Conference, June 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE Access

Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE Access
Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

Received June 23, 2020, accepted July 12, 2020, date of publication July 20, 2020, date of current version August 14, 2020.
Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3010276

Coordinated Control of Electric Vehicles and Renewable Energy Sources for Frequency Regulation in Microgrids

PHOOMPAT JAMPEETHONG, (Member, IEEE), AND SURIN KHOMFOI, (Senior Member, IEEE)
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Corresponding author: Phoompat Jampeethong (60601177@kmitl.ac.th)

ABSTRACT A Control technique of electric vehicles (EVs) cooperating with ac microgrids is considered as an important role with integration of renewable energy sources (RES), i.e. wind and solar farms. As known, the intermittent power generations of these RESs can provide significant changes of the frequency in microgrids. Consequently, outputs of these generations are regarded as continuous disturbances. Previously, the ability to permit frequency stabilizing effect was usually neglected in microgrid design; thereupon, the performance of controller may be ineffective to regulate the frequency in such a microgrid. To address this problem, a new coordination of EV, wind farm (WF), and photovoltaic (PV) for microgrid frequency regulation is proposed in this article. In the control design, the proposed adaptive PI controller is developed by using practical proportional integral (PI) controllers. An effect of a small delay is also considered in input-output pairs of the adaptive PI controllers. Simulation model is developed for validating the proposed controller. Simulation results demonstrate that the proposed coordinated control technique of EVs, WF, and PV power generation provides a better frequency regulation performance than a fixed PI controller under various uncertainties such as wind and solar power fluctuations, N-1 outages, disconnection of RESs, load variations, and the number of EVs.

INDEX TERMS Coordinated control, electric vehicle, frequency control, microgrid, renewable energy.

I. INTRODUCTION

Energy management and the environmental crisis are challenging problems in electrical power systems, especially in modern microgrids, because of the restriction of conventional generators and uncertain load demands [1]–[3]. Also, renewable energy sources (i.e., wind farms (WFs) and photovoltaic generation (PVs)) and electric vehicles (EVs) have increasingly been participating in microgrids for generating electrical power [4], [5]. Their high penetration level will provide power support in microgrids [6]. Thereupon, uncertainties from WFs, PVs, and EVs can affect the ability to synchronize loads and generators [7]: these problems restrict from the system inertia being reduced by replacement with such uncertain sources. Moreover, the interaction of electronic-based devices will degrade frequency stability and will eventually lead to system instability without proper control action [8]. Therefore, in the mentioned microgrids, a proper coordinated control strategy from WF, PV and EV sources should be applied to address this problem.

In recent years, several methods and concepts have been proposed to suppress frequency fluctuation in microgrids. In [9], the impact of communication delays on secondary frequency control in a microgrid has been thoroughly investigated. The effect of communication delay is obviously shown to be harmful in secondary frequency control; so, a gain scheduling approach is applied to compensate for the effect of the communication delay. A robust H_∞ and μ-synthesis control strategy to regulate frequency in the microgrid have been proposed in [10]. The method proposed in [10] considers structured and parametric uncertainties in the control design: the results demonstrate that μ-synthesis control provides better performance than H_∞ control. However, in the microgrid configuration in [9], [10] did not address the uncertainty effects from renewable generation. In addition, Tustin's technique based on digital decentralized load frequency control in a microgrid including WFs has been proposed in [11]. The decentralized

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Fabio Massaro.

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License. For more information, see https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

proportional–integral–derivative (PID) controller is optimized by using a particle swam algorithm. Moreover, communication time delay is also considered in the control loop. Comparing to the analog model, the digital control model performs superior frequency control in terms of reliable performance and satisfactory effective control as discussed in [11]. A cooperative frequency and voltage control method for low-voltage islanded microgrids based on distributed cooperative control has been discussed in [12]. The simulation study in [12] shows that the proposed method could restore frequency under droop-based optimal active power control. An adaptive event-triggered load frequency control has been proposed in [13]. The proposed method in [13] is applied to interconnected microgrids. The results show that large frequency deviation can occur by unbalanced power and time delay. Doubly-fed induction generator (DFIG) control for frequency regulation in a microgrid has been presented in [14]. Simulation results indicate that the DFIG control can provide a fast response to frequency control and consequently contribute to the reduction of frequency deviation. This work also illustrates that the DFIG converter provides faster response than that of conventional plants, i.e., thermal and hydro power plants. However, the study in [14] discusses that wind power uncertainty may have a negative impact on frequency stability. H_∞ robust virtual inertia control of a microgrid with high penetration of renewable energy has been presented in [7]. The study shows that a system inertia is decreased by high penetration of renewable energy owing to its adverse effect on frequency stability [15]. A new application of a robust virtual inertia controller equipped with an energy storage system has been presented in an islanded microgrid with wind and solar farm sources [15]. TThe coefficient diagram method is used to control the virtual inertia. The results, compared with that of the method in [7], demonstrate that the proposed method in [15] provides a better stabilizing effect in terms of frequency regulation. As can be seen, majority of proposed controllers in [11]–[15] are designed in a specific microgrid operation and may not function well in other microgrid operations. Thus far, a few researches have been discussed a coordinated controller in a microgrid including EVs.

Moreover, load frequency control (LFC) in hybrid systems (comprising of WFs, PVs, EVs diesel generator, etc.) has been proposed in [16], [17]. Several optimization techniques have been applied to optimally tune the control parameters of PID controller; for instance, particle swarm optimization (PSO), improved PSO [16], firefly algorithm [16], butterfly optimization (BO) [18], water cycle algorithm (WCA) [16], yellow saddle goatfish algorithm (YSGA) [19], mine blast algorithm (MBA) [17]. It has been reported that the non-integer fractional-order proportional-integral-derivative (FOPID), optimally tuned with WCA, can withstand the change synchronizing coefficient, loading condition, and frequency bias [16]. By using MBA based 2 degree of freedom PID [17], the results have demonstrated that the proposed controller can reduce adverse effects of uncertainties form WFs and PVs; By using BO-based PFOID [18], the results have established the superiority of the BOA-based PFOID controllers under different operating points in terms of frequency fluctuation, tie-line power; By using YSGA-optimized dual-stage PIFOD-one plus PI (PIFOD-(1 + PI)) [19], the results have shown that the proposed YSGA-optimized PIFOD-(1 + PI) can resist variations of wind turbine and system parameters. More comprehensive literature of different controllers utilized in hybrid systems for LFC can be found in [20]. However, in the mentioned of previous works, 1) impact of a small delay in control loops was not considered, 2) optimal fixed control parameters were used for PID controller design. Accordingly, the previous PIDs may not resist the nonlinearity in practical systems.

A coordinated control applying for EVs and renewable energy sources in a microgrid with continuous disturbances is developed in this research to overcome mentioned problems. In the control design, an adaptive PI controller incorporating with a small delay consideration in the control loop are used to regulate frequency at various operating points. The main contributions of this work are listed as follows:

i) The control system is highly robust against various operations, uncertainties, and continuous disturbances,
ii) Coordinated control of EVs and renewable energy sources for stabilizing frequency in a microgrid is achieved,
iii) A small variable time delay in the proposed adaptive PI controller is considered,
iv) A new algorithm, which can automatically change control parameters for frequency stability in a microgrid under various operations, is also developed.

II. CONTROL OVERVIEW

The proposed coordinated control of EVs and wind and solar PV generation in a microgrid is illustrated in Fig. 1. As can be seen, the diagram mainly consists of a group of EVs, solar PVs, and WFs, for supplying load demand. In this study, load, number of EVs, PV and WF power output are assumed to be varied. As a result of these variations, there are significant change of power generation in the total of frequency of the microgrid. To address this problem, frequencies of EV, PV, and WF buses and loads are observed by using data analysis and detection to ascertain the frequency deviation. When the frequency deviation falls into the unacceptable range, the centralized controller is activated to regulate and maintain the frequency within the acceptable range. An energy storage system is connected to the same bus as the EVs to manage the EV power output. However, the PV and WF converters are modulated to control power output of such renewable energy generation. As a result, such control action can regulate the frequency deviation in the microgrid. In this article, the use of a practical PI controller structure will be implemented which is modeled as an adaptive controller so that it can be operated under various uncertainties and disturbances. Moreover, the impact of a small delay is regarded in the control loop.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

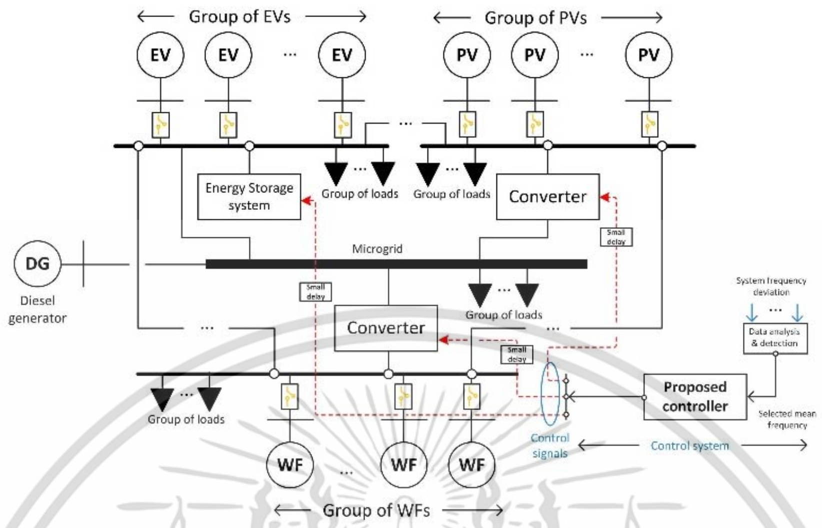


FIGURE 1. Control overview.

The adaptive PI controller will be clearly explained in the next section.

III. MICROGRID MODELING

In this section, the models of the EVs, PVs, WFs and the adaptive controller are created. To begin with, a microgrid state equation will be formulated; then, the control design problem can be obtained.

A. TEST MICROGRID SYSTEM

enerally, frequency stability concerns keeping an equilibrium between loads and generation [21]. Unbalance between load consumptions and power generation in a microgrid with RES always occurs. As a result, it is crucial that a suitable controller strategy should be carefully conducted. Here, the studied microgrid system consisting of EVs, PVs, and WFs is demonstrated in Fig. 2. The relationship among power generation, load demand, system inertia, damping coefficient, and frequency deviation is generally defined by the swing equation as demonstrated in [22],

$$\sum_{i=1}^{N_G}(\Delta P_{m,i}) - \sum_{l=1}^{N_l}(\Delta P_{L,l}) = 2Hs\sum_{i=1}^{N_G}(\Delta F) + D\sum_{i=1}^{N_G}(\Delta F), \tag{1}$$

where ΔF is the frequency deviation; ΔP_m is the change of total generation from EVs, PVs, and WFs; ΔP_L is the change in load power demands; H is the system inertia, and D is the damping factor. Assuming that there is a very small inertia in EVs, PVs, and WFs that can be ignored; then, the relationship between the inertia of the synchronous generator and the microgrid can be determined as clearly explained in [7], [8].

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{N_G}(H_{G,i} \cdot S_{G,i})}{S_{MG}}, \tag{2}$$

where N_G is a total number of generators, $S_{G,i}$ and $H_{G,i}$ are the rated power and inertia of the i^{th} generator, respectively. S_{MG} is the rated microgrid power. If we focus on inertia response, the stored inertia power (i.e., kinetic energy) in the rotors of the synchronous generators will counteract the imbalance through the inertia control until before the primary control is used. Additionally, the frequency deviation can be eliminated by controlling the injecting powers of EVs, PVs, and WFs via converters. To robustly maintain the frequency at a nominal value (50±0.5 or 60±0.6 Hz) under various microgrid operations, two control strategies are mainly employed: primary (droop) control and converter control as shown in Fig. 2.

Next, a small variable delay can be formulated as studied in [23],

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau}, \tag{3}$$

where τ, $\bar{\tau}$, and $\Delta\tilde{\tau}$ are the variable time delay, mean value, and variable parts of the variable time delay, respectively. In the frequency domain, equation (3) can be approximated by the first-order Padé approximation [24],

$$e^{\tau s} = \frac{1 - \tau s}{1 + \tau s}, \tag{4}$$

where e is the natural exponential constant, $s = j\omega_0$ is the complex plane, $j = \sqrt{-1}$ is the complex value, and ω_0 is the natural frequency in rad/s. Substituting (3) into (4), we can get

$$e^{(\bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau})s} = \frac{1 - (\bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau})s}{1 + (\bar{\tau} \pm \Delta\tilde{\tau})s}. \tag{5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

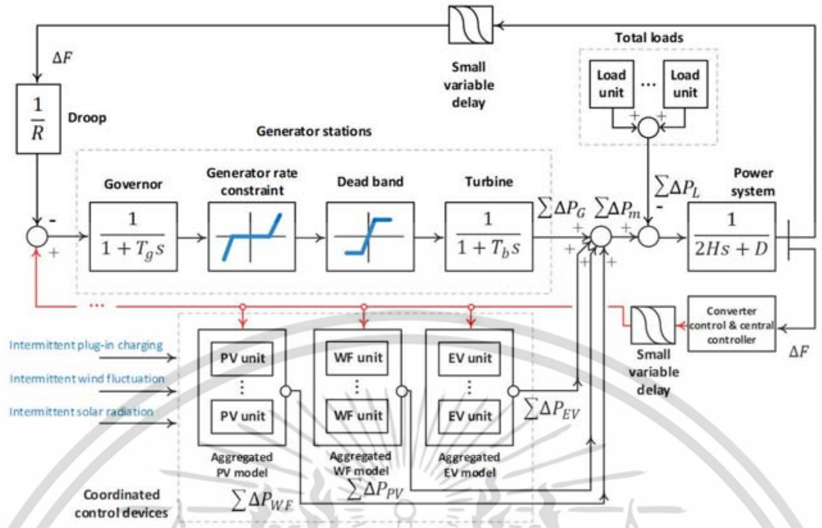


FIGURE 2. Proposed coordinated microgrid control strategy.

Then, at an operating point, the variable time delay can be assumed to be constant as shown in (6).

$$e^{(\bar{\tau}\pm\Delta\tilde{\tau})s} = c_{\bar{\tau}} + c_{\tilde{\tau}}, \tag{6}$$

where $c_{\bar{\tau}}$ and $c_{\tilde{\tau}}$ are constant values at an operation. It should be noted that, although a small delay occurs in control loops, the variable part will cause a malfunction of the control system. As a result, equations (5) and (6) should be considered in microgrid control strategies.

Recently, the synchronous generators in microgrids have been replaced by inverter/converter based RESs. Hence, the response of system inertia (H) and system damping (D), typically during $1-10$ s, is significantly decreased. Accordingly, the rate of change of frequency (derivative of frequency, $\frac{dF}{dt}$) of the microgrids increases, leading to rapid frequency deviation, larger frequency drop and dip, system instability, and, in the worst case, a rapidly cascading failure or power blackout. It should be noted that, during the short time interval of $1-10$ s, the primary control loop may not be effective enough to counteract the contingency, especially under the severe situations of low system inertia caused by renewable energy sources. EV, PV, and WF modeling charts are given in Figs. 3(a), 3(b), and 3(c), respectively. For the EV in Fig. 3(a), the signal from the controller is sent to the energy storage system to charge or discharge power from the EVs. For the PV and WF in Figs. 3(b) and 3(c), the signal from the controller is added to the PWM controller and the current setpoint controller of the PV and WF to modulate the signal in the converter. As a result, the frequency can be regulated.

B. CONTINUOUS DISTURBANCE MODELING

In this article, the continuous disturbance from uncertain modeling (i.e., PV and WF) is given by sum of sine and square

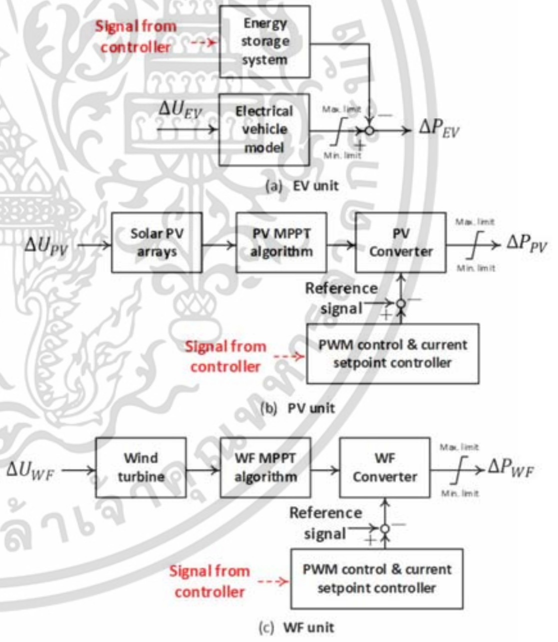


FIGURE 3. EV, PV, and WF modeling.

wave components as follows,

$$\Delta U_{PV}(s) = \bar{U}_{PV} \pm \Delta\tilde{U}_{PV}(s), \tag{7}$$

$$\Delta U_{WF}(s) = \bar{U}_{WF} \pm \Delta\tilde{U}_{WF}(s), \tag{8}$$

where $\bar{U}_{PV}$ and $\bar{U}_{WF}$ are mean values of solar radiation and wind speed, respectively, and $\Delta\tilde{U}_{PV}$ and $\tilde{U}_{WF}(s)$ are

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

variable parts of solar radiation and wind speed, respectively. Applying (7) and (8) to the microgrid will lead to a significant deviation in system frequency. In this article, an intermittent number of EVs charging in a day is modeled by,

$$\Delta U_{EV} = \sum_{i=1}^{N_{EV}} (L_{EV} \cdot P^{r}_{EV,i}), \tag{9}$$

where N_{EV} is the total number of EVs in the grid, L_{EV} is a logical number (0 or 1), and $P^{r}_{EV,i}$ is the rated power of the i^{th} EV. In fact, the number of EVs at the charging station varies. As a result, the variation can also affect frequency deviation in the PVs and WFs.

C. MICROGRID CONFIGURATION

The studied microgrid in Fig. 1 contains several types of generation sources with different types of load, utilized to establish the multisource nature of the microgrid. The main thermal power station has 15 MW of installed capacity, representing conventional generation using synchronous based generator. The generated electricity is consumed by a load at rated power about 55 MW. The system has 3×7 MW installed capacity for the WFs and 3×5 MW installed capacity for the PVs. In addition, EVs with a total power capacity of 30×0.1 MW are also connected to the microgrids as shown in Fig. 1. It is assumed that the energy storage system with the same size as the total EV energy is connected at the same bus to control power output of those EVs. As a result, the renewable power generation and EVs will randomly change the microgrid operating point, affecting system frequency stability and performance. It should be noted that the system base is 20 MW.

Fig. 2 is developed for both frequency analysis and study. To obtain the physical system dynamics, the generation rate constraint (GRC) for the governor unit, dead band for the turbine unit, and time delay for the secondary control or load frequency control (LFC) unit are contemplated which create an accurate frequency perception and nonlinearity of the microgrid. Therefore, the GRC is specified as $\approx 10\% - 15\%$ MW/min. The dead band limiter is specified as 0.06% (0.035 Hz). The local time delay is varied between 0 and 0.05 s. Three main control units (droop control, energy storage system, and converter) are applied to maintain system frequency stability during the exigency. The inertia control-based energy storage system is responsible for balancing the mismatch power at $1 - 10$ s. The primary control unit (i.e., the governor) is applied to stabilizing the system frequency to a new steady-state value within $10 - 30$ s. The converter control based on area control error is responsible for recovering the system frequency to its nominal value within $10 - 30$ minutes. However, because uncertain load demands (industrial and/or commercial and/or residential loads) do not participate in the frequency regulation, they can be regarded as disturbances to microgrid uncertainties. This is confirmed that the simplified model has high accuracy under a wide range of operating conditions. Therefore, the simplified model used in this article is accurate enough for frequency stability study and analysis. Moreover, the converter can provide very fast frequency recovery, so it can be ensured that converter control can be effectively used to stabilize frequency deviation.

Next, by considering the dynamic effects of 1) generation and loads including inertia, droop, and 2) converter control of EVs, PVs, and WFs, the system frequency deviation explained in [7], [8] is given as,

$$\Delta F(s) = \left(\frac{1}{2HsD}\right) \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{m,i} - \sum_{l=1}^{N_l} \Delta P_{L,l}. \tag{10}$$

Then, we have

$$\Delta F(s) = \left(\frac{1}{2HsD}\right) \Big(\sum \Delta P_G + \sum \Delta P_{EV} + \sum \Delta P_{PV} + \sum \Delta P_{WF}\Big) - \sum_{l=1}^{N_l} \Delta P_{L,l}. \tag{11}$$

where $\{\Delta P_G, \Delta P_{EV}, \Delta P_{PV}, \Delta P_{WF}\} \in \Delta P_{m,i}$.

The state equation in the model as shown in Fig. 2 can be written as (12) and (13) which are used for testing the performance of the proposed control method as,

$$\Delta\dot{\mathbf{X}}(s) = A\Delta\mathbf{X}(s) + B\Delta\mathbf{U}(s), \tag{12}$$

$$\Delta\mathbf{Y}(s) = C\Delta\mathbf{X}(s) + D\Delta\mathbf{U}(s). \tag{13}$$

It is assumed that there is no feed forward in this system: so, $D = [0]$. Substituting (4)-(6) in (12) and (13), the system including variable time delay at the input-output pair of controller is given as,

$$\Delta\dot{\mathbf{X}}(s) = A\Delta\mathbf{X}(s) + B\Delta\mathbf{U}(s) \cdot e^{\tau s}, \tag{14}$$

$$\Delta\mathbf{Y}(s) \cdot e^{\tau s} = C\Delta\mathbf{X}(s) \cdot e^{\tau s}, \tag{15}$$

where $\dot{\mathbf{X}}$ is the derivative of state the variable in the microgrid; $X, U,$and Y are state, input, and output vectors, respectively, and $A, B, C,$and D are state, input, output, and feed forward metrics, respectively. As a result, the system in Fig. 2 can be written as a closed-loop system by using the feedback gain law [25] as follows,

$$\Delta\dot{\mathbf{X}}'_{cl}(s) = (A - B\mathbf{U}(s) \cdot e^{\tau s}) \cdot \Delta\mathbf{X}_{cl}(s) \tag{16a}$$

$$= (A - B\mathbf{U}(s)P(s)) \cdot \Delta\mathbf{X}_{cl}(s) \tag{16b}$$

$$= [A\Delta\mathbf{X}_{cl}(s)] - [B'\mathbf{U}'(s) \cdot \Delta\mathbf{X}'_{cl}(s)], \tag{16c}$$

where superscript $'$ means that variable time delay is included, and $P(s)$ is the rational polynomial matrix of the variable time delay.

In this article, $\mathbf{K}(s)$ can be written in a form of output $\Delta\mathbf{Y}$ and control signals $\Delta\mathbf{U}$ by rewriting (16c) as,

$$\Delta\dot{\mathbf{X}}'_{cl}(s) = [A\Delta\mathbf{X}_{cl}(s)] - [B' \cdot C'\Delta\mathbf{X}'(s)\mathbf{K}(s) \cdot \Delta\mathbf{X}'_{cl}(s)], \tag{17}$$

where subscript cl means of the close-looped system. In can be seen that variable time delay affects the second term of (17) and can degrade the closed-loop system stability.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In this article, $K(s)$ is the adaptive PI controller consisting of proportional K_p and integral K_i, and it can be written as,

$$\mathbf{K}_k(s) = K_{p,k} + K_{i,k}s, \tag{18}$$

where subscript k denotes the k^{th} operation.

D. PROPOSED PI CONTROLLER UNDER VARIOUS OPERATIONS

In the time domain t, the fixed structure controller may not be able to regulate the system frequency under such changing operations because the operation of the system always changes. To design a PI controller under different operations, the closed-loop state equation in time domain is given by,

$$\Delta\dot{\mathbf{X}}'_{cl,k}(t) = A'_{cl,k}(t)\mathbf{X}'_{cl,k}(t), \tag{19}$$

where $A_{cl,k}$ is the closed-loop state matrix including $\mathbf{K}_k$ at any k^{th} operating points. Then, rewriting (19) in the form of elements in the matrix yields,

$$\dot{\mathbf{X}}'_{cl,k}(t) = \begin{bmatrix} a_{11,k}(t) & \cdots & a_{1m,k}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1,k}(t) & \cdots & a_{mm,k}(t) \end{bmatrix}_{m\times m} \times \begin{bmatrix} x_{1,cl} \pm \Delta x_{m,k}(t) \\ \vdots \\ x_{m,cl} \pm \Delta x_{1,k}(t) \end{bmatrix}_{m\times 1}, \tag{20}$$

where $a_{11,k}, \cdots, a_{mm,k}$ are the elements of $A_{cl,k}$, $x_{1,cl}, \cdots, x_{m,cl}$ are elements of $\mathbf{X}'_{cl,k}$ in steady state, and $\Delta x_{1,k}(t), \cdots, \Delta x_{m,k}(t)$ are small changes of the elements of $\mathbf{X}'_{cl,k}$, where subscript m is the dimension of the matrix. At the k^{th} operation, let $\dot{\mathbf{F}}'_k$ be the derivative of system frequency, $f_{1,k}, \cdots, f_{n,k}$ be state variables corresponding to frequency, and $d^f_{11,k}, \cdots, d^f_{nn,k}$ be elements of the frequency matrix, where $\dot{\mathbf{F}}'_k \in \mathbf{X}'_{cl,k}$ and $n < m$. Extracting (20) by focusing only on frequency, we have,

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_{1,k}(t) \\ \vdots \\ \dot{f}_{1,k}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^f_{11,k} & \cdots & d^f_{1n,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d^f_{n1,k} & \cdots & d^f_{1n,k} \end{bmatrix}_{n\times n} \times \begin{bmatrix} f \pm \Delta f_{1,k}(t) \\ \vdots \\ f \pm \Delta f_{n,k}(t) \end{bmatrix}. \tag{21}$$

Then, expressing (20) yields,

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_{1,k}(t) \\ \vdots \\ \dot{f}_{1,k}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^f_{11,k}(f \pm \Delta f_{1,k}(t)) + \cdots + d^f_{1n,k}(f \pm \Delta f_{n,k}(t)) \\ \vdots \\ d^f_{11,k}(f \pm \Delta f_{1,k}(t)) + \cdots + d^f_{1n,k}(f \pm \Delta f_{n,k}(t)) \end{bmatrix}_{n\times 1}. \tag{22}$$

It is obvious from (22) that, when $d^f_{11,k}, \cdots, d^f_{nn,k}$ are minimized by changing the control parameters in $\mathbf{K}_k$, the effect of frequency deviation $\Delta f_{1,k}, \ldots, \Delta f_{n,k}$ is consequently reduced. As a result, this impact can be alleviated by minimizing the following function,

$$\min \left\{ \begin{matrix} \left|d^f_{11,k}\right| \cdots \left|d^f_{1n,k}\right| \\ \vdots \\ \left|d^f_{n1,k}\right| \cdots \left|d^f_{nn,k}\right| \end{matrix} \right\}, \tag{23}$$

$$\text{Subject to} \quad 0.95f < f < 1.05f, \tag{24}$$

where min means the minimum value and $|\cdot|$ denotes the absolute value.

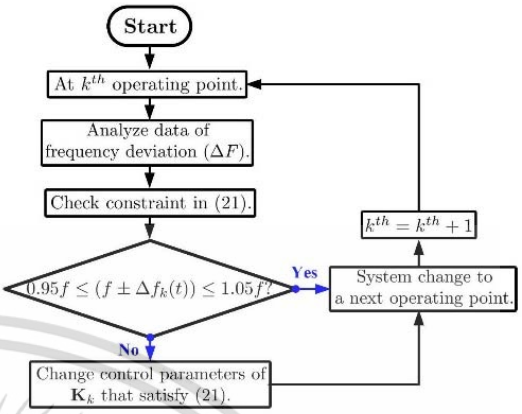


FIGURE 4. Flowchart of the proposed control strategy.

E. PROPOSED ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM

The proposed adaptive control algorithm is applied to change the control parameters of $\mathbf{K}_k$ to guarantee the minimum value of (23) under constraints (24) under all operations. Fig. 4 demonstrates the proposed adaptive control algorithm. It can be described by the following steps:

e.i) At any k^{th} operation, we can analyze the frequency deviation data $\Delta\mathbf{F}$,

e.ii) Next, we can check constraint (24);
If $0.95f < (f \pm \Delta f_k(t)) < 1.05f$, find optimal control parameters $\mathbf{K}_{p,k}$ and $\mathbf{K}_{i,k}$ that satisfy (23);
Otherwise, the system is changed to the next operation: $k^{th} = (k+1)^{th}$,

e.iii) At the next $k^{th} = (k+1)^{th}$ generation, we can reconsider the system by going to step *e*.i). and recheck constraint (24) by going to step *e*.ii).

By repeatedly conducting steps *e*.i) - *e*.iii), the value of (23) is consequently minimized at all operating points. Consequently, oscillations of frequency under all operations are suppressed. Note that, the optimization problem of (23) is solved by using the particle swarm algorithm [26], [27].

The superiority of the proposed adaptive controller over conventional fixed controllers are given as follows:

i) The proposed adaptive controller can automatically adapt their control parameters to satisfy the objective function (23) under the constraint (24). As a result,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

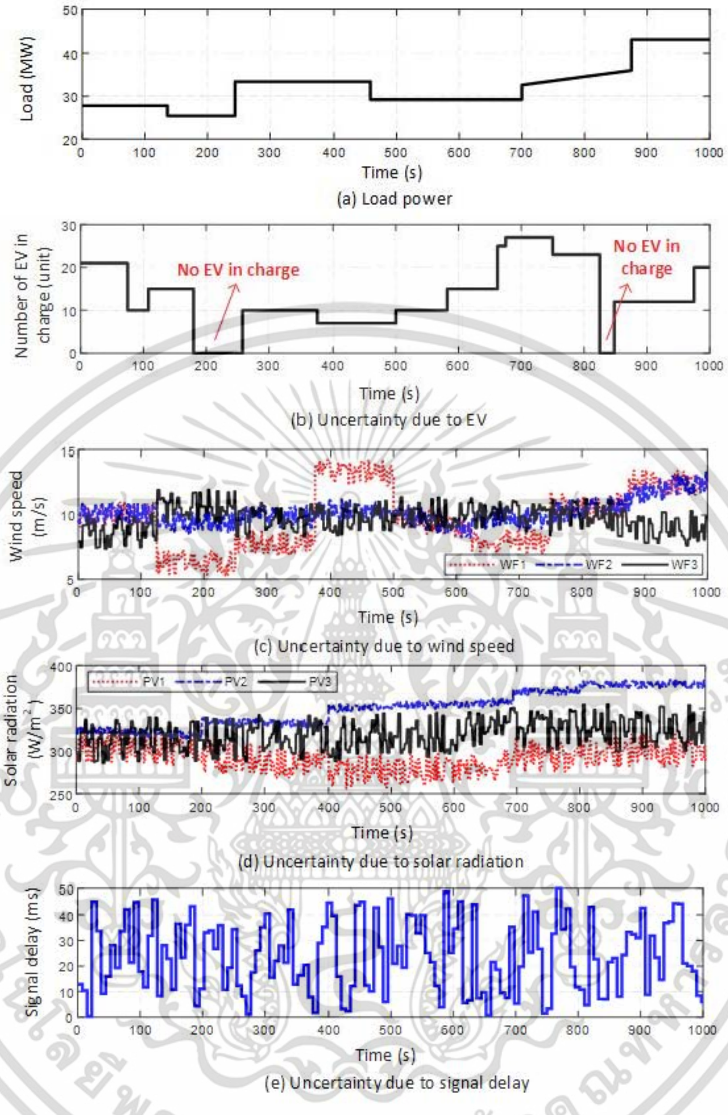


FIGURE 5. Patterns of load, number of EVs charging, wind speed, solar radiation, and signal delay.

the frequency fluctuation can be suppressed in a wind range of system operating points,

ii) Since the optimization is conducted in frequency domain using only data of frequency deviation in the system, the fast computational time can be guaranteed. As a result, the proposed method is suitable for a real time application.

IV. RESULT AND DISCUSSION

Simulation results of the case study in this section were conducted by using MATLAB and Simulink with the Control System Toolbox [28], Signal Processing Toolbox [29], and Optimization Toolbox [30]. The system parameters in Fig. 2 used as the study system are given in Table 1. In this study, the proposed controller, designed by using objective function (23) based on the adaptive algorithm in Fig. 4, is recognized as the *proposed adaptive PI controller*. To verify the performance of the proposed method, the *proposed adaptive PI controller* is compared with the conventional fixed PI controller (known as the *fixed PI controller*) under various uncertainties and disturbances. To demonstrate the superiority of the adaptive algorithm, the *fixed PI controller* is designed by using objective function (23) at the normal operating point $t = 0$s.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

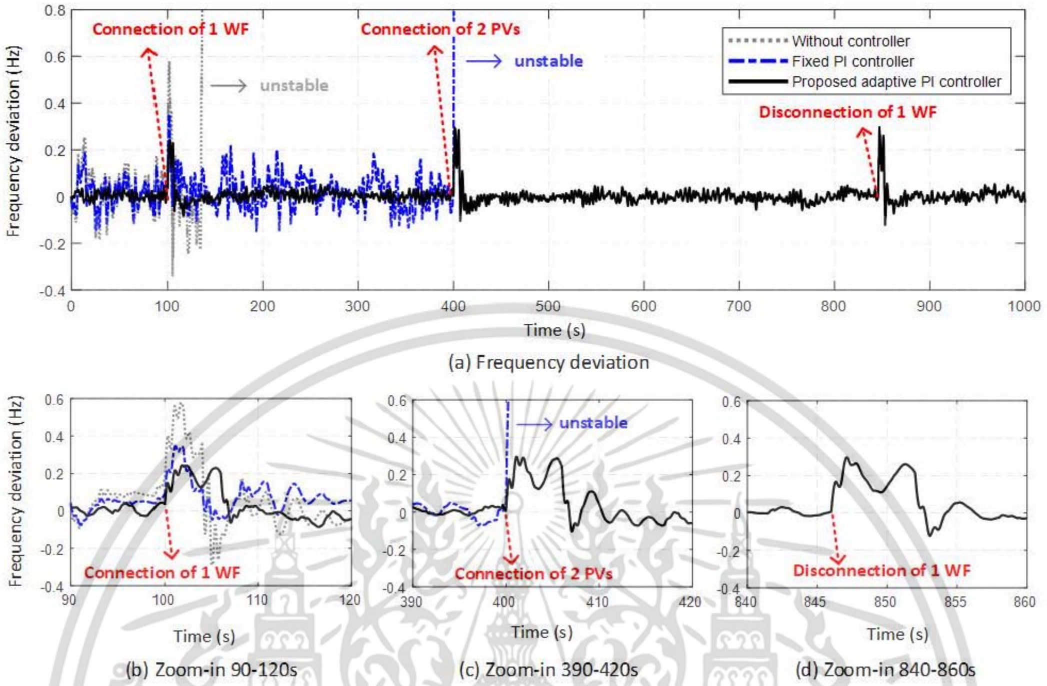


FIGURE 6. Frequency deviation under the effect of continuous uncertainties and disturbances.

TABLE 1. System parameters (system base of 50 Hz and 20 MW).

Parameter	Value
Damping coefficient, D	0.02 pu
Inertia constant, H	0.080 pu
Governor time constant, T_g	0.12 s
Turbine constant, T_b	0.43 s
Droop, R	1.75
Maximum limit of PI controller	+0.2 pu
Minimum limit of PI controller	-0.2 pu

Then, the transient simulation was conducted. Fig. 5. shows patterns of load, number of EVs charging, wind speed, solar radiation, and signal delay used in the simulation study. Fig. 5(a) illustrates the changes in load between 25 and 45MW during the simulation time. Fig. 5(b) depicts the pattern of the number of EVs charging. It can be seen that the number of EVs varies according to the time frame. During 180-350s and 820-840s, it is assumed that there are no EVs at the charging station. During these periods, the EVs are unavailable and cannot be used to stabilize the frequency fluctuation. As shown in Fig. 5(c), the WFs are simulated under variable wind speeds between 6 and 15 m/s. Here, the wind gust effect (abrupt variance from ≈5 to ≈15 m/s) is also applied to WF1 during 120 – 500 s. In the same way, in Fig. 5(d), the solar radiation of the three PVs is varied between 250 and 375 W/m^2. Also, the impact of signal delay in Fig. 5(e) is also considered in all input–output pairs of both the *proposed adaptive PI controller* and the *fixed PI controller*.

Fig. 6(a) illustrates the frequency deviation under the effect of such continuous uncertainties and disturbances described as follows: At $t = 0$s, during a light load, only two WFs and 1 PV are connected to the supply power of the microgrid. During $0 - 100$s, the proposed adaptive PI controller exhibits a better stabilizing effect in suppressing frequency deviation while the stabilizing effect of the *fixed PI controller* is slightly better than that without the controller. At $t = 100$s, one WF is connected to the microgrid. In the case without a controller, the peak of frequency deviation under the effect of this disturbance is vanished beyond 0.5 pu (or > 5% from the normal value). Conversely, in the case of the *proposed adaptive PI controller* and *fixed PI controller*, these controllers can keep the frequency deviation within an acceptable range (within ±5% of the normal value). An enlarged section of this state is given in Fig. 6(b).

During $100-400$s, it can be clearly observed that, at around $t = 120$s, the microgrid becomes unstable without a controller. Moreover, the *proposed adaptive PI controller* provides a significantly superior stabilizing effect compared to that of the fixed PI controller. At $t = 400$s, the load increases and two PVs are connected to supply the power to this inflated load. Accordingly, the *fixed PI controller* cannot resist this change, and the system becomes completely unstable. In contrast, the *proposed adaptive PI controller* can robustly

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

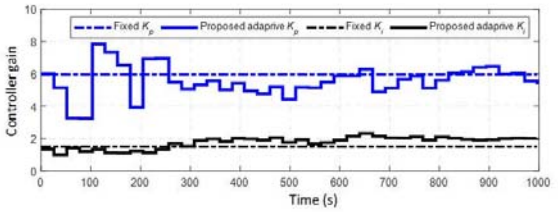


FIGURE 7. Control parameters under the effect of continuous uncertainties and disturbances.

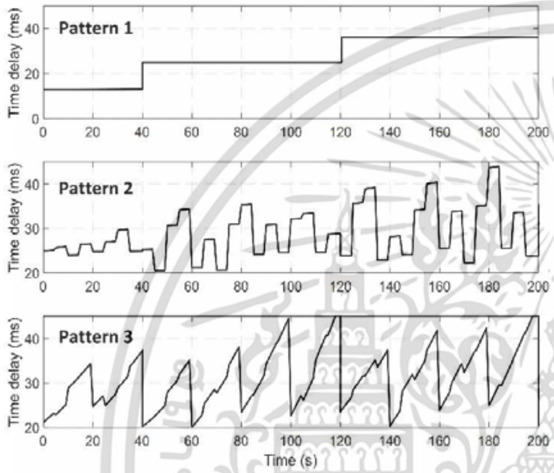


FIGURE 8. Different patterns of time delay.

maintain the frequency deviation within a stable region. Fig. 6(c) depicts an enlarged section in this period.

During $t = 400 - 1000$ s, similarly, the proposed adaptive PI controller is able to maintain frequency in the acceptable range regardless of the disconnection of the WF. Fig. 6(c) illustrates an enlarged section in this period.

Fig. 7 shows control parameters of the proposed adaptive PI controller under the effect of continuous uncertainties and disturbances. Evidently, by applying the adaptive algorithm proposed, the gains are adaptive under changing operation to maintain a minimal value of (23); therefore, the proposed controller can robustly regulate the frequency deviation of the microgrid.

Besides, the robustness of the *proposed adaptive PI controller*, validated with various time delay scenarios is investigated. Scenarios of load patterns, number of EVs charging status, wind speed, and solar radiation as shown in Fig. 5 are used in this study when the simulation time is set at 200s. Fig. 8 shows the different patterns of time delay used in this study. In Fig. 8, pattern 1 is constant time delay increasing with time domain. Patterns 2 and 3 are realistic delays of wide-area measurement system as analyzed in [31]. Note that fixed delay is set at 25ms. Accordingly, Fig. 9 demonstrates the impacts of different patterns of time delay on the *proposed adaptive PI controller* and *fixed PI controller*.

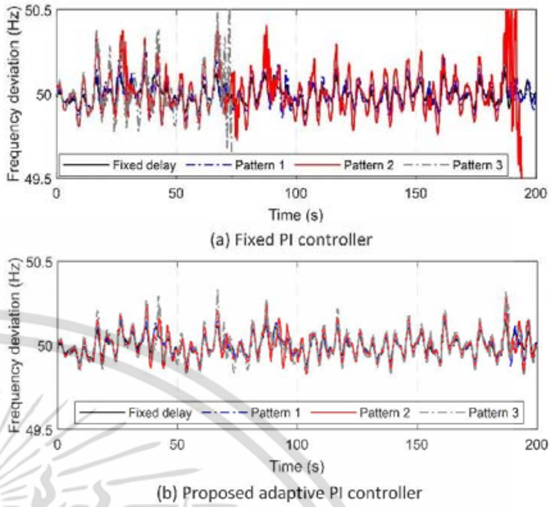


FIGURE 9. Impact of different patterns of time delay.

In comparison, the *fixed PI controller* cannot resist realistic time delay effects; more specially in time delay pattern 3 as depicted in Fig. 9 (a): this leads to system instability. On the other hand, the *proposed adaptive PI controller* can robustly handle adverse effects of all delay patterns as shown in Fig. 9 (b).

V. CONCLUSION

The coordinated control of EVs and WF and PV generation of a microgrid for microgrid frequency regulation has been proposed in this article. The significant findings are given as follows:

i) Mathematical analysis of microgrid system including WFs, PVs and EVs is given. Moreover, effect of time delay and continuous disturbance is investigated,
ii) Significant improvement in frequency stability can be obtained by using the proposed adaptive PI controller under disconnection and connection of renewable energy sources,
iii) By applying the proposed algorithm, the proposed controller can adaptively change the control parameters according to system operations including dynamic models of WF, PV, and EVs,
iv) Superior stabilizing effects of the proposed adaptive PI controller over a conventional fixed PI controller can be achieved under continuous system uncertainties, disturbances, and various patterns of realistic time delay.

According to the obtained results, it is promising that the proposed adaptive coordinated controller can be applied in a microgrid, consisting of WF, PV and EVs. Also, the developed adaptive controller can be an alternative control solution for supporting the use of renewable energy sources in microgrids.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REFERENCES

[1] A. Rabiee, A. Soroudi, B. Mohammadi-ivatloo, and M. Parniani, "Corrective voltage control scheme considering demand response and stochastic wind power," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2965–2973, Nov. 2014.

[2] U. Munz, A. Mesanovic, M. Metzger, and P. Wolfrum, "Robust optimal dispatch, secondary, and primary reserve allocation for power systems with uncertain load and generation," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 475–485, Mar. 2018.

[3] R. Doherty and M. O'Malley, "A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 587–595, May 2005.

[4] K. Rahbar, C. C. Chai, and R. Zhang, "Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1482–1493, Mar. 2018.

[5] Y. Zhang, N. Gatsis, and G. B. Giannakis, "Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 944–953, Oct. 2013.

[6] B. Jie, T. Tsuji, and K. Uchida, "Analysis and modelling regarding frequency regulation of power systems and power supply–demand-control based on penetration of renewable energy sources," *J. Eng.*, vol. 2017, no. 13, pp. 1824–1828, 2017.

[7] T. Kerdphol, F. S. Rahman, Y. Mitani, M. Watanabe, and S. Kufeoglu, "Robust virtual inertia control of an islanded microgrid considering high penetration of renewable energy," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 625–636, 2018.

[8] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, Y. Mitani, D. Turschner, and H.-P. Beck, "Enhanced virtual inertia control based on derivative technique to emulate simultaneous inertia and damping properties for microgrid frequency regulation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 14422–14433, 2019.

[9] S. Liu, X. Wang, and P. X. Liu, "Impact of communication delays on secondary frequency control in an islanded microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2021–2031, Apr. 2015.

[10] A. Fathi, Q. Shafiee, and H. Bevrani, "Robust frequency control of microgrids using an extended virtual synchronous generator," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6289–6297, Nov. 2018.

[11] G. Magdy, G. Shabib, A. A. Elbaset, T. Kerdphol, Y. Qudaih, H. Bevrani, and Y. Mitani, "Tustin's technique based digital decentralized load frequency control in a realistic multi power system considering wind farms and communications delays," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 327–341, Jun. 2019.

[12] X. Wu, C. Shen, and R. Iravani, "A distributed, cooperative frequency and voltage control for microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2764–2776, Jul. 2018.

[13] H. Li, X. Wang, and J. Xiao, "Adaptive event-triggered load frequency control for interconnected microgrids by observer-based sliding mode control," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 68271–68280, 2019.

[14] J. Zhao, X. Lyu, Y. Fu, X. Hu, and F. Li, "Coordinated microgrid frequency regulation based on DFIG variable coefficient using virtual inertia and primary frequency control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 3, pp. 833–845, Sep. 2016.

[15] H. Ali, G. Magdy, B. Li, G. Shabib, A. A. Elbaset, D. Xu, and Y. Mitani, "A new frequency control strategy in an islanded microgrid using virtual inertia control-based coefficient diagram method," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 16979–16990, 2019.

[16] A. Latif, D. C. Das, S. Ranjan, and A. K. Barik, "Comparative performance evaluation of WCA-optimised non-integer controller employed with WPG–DSPG–PHEV based isolated two-area interconnected microgrid system," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 13, no. 5, pp. 725–736, 2019.

[17] S. Ranjan, D. C. Das, A. Latif, and N. Sinha, "LFC for autonomous hybrid micro grid system of 3 unequal renewable areas using mine blast algorithm," *Int. J. Renew. Energy Res. (IJRER)*, vol. 8, no. 3, pp. 1297–1308, 2018.

[18] A. Latif, D. C. Das, A. K. Barik, and S. Ranjan, "Maiden coordinated load frequency control strategy for ST-AWEC-GEC-BDDG-based independent three-area interconnected microgrid system with the combined effect of diverse energy storage and DC link using BOA-optimised PFOID controller," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 13, no. 14, pp. 2634–2646, Oct. 2019.

[19] A. Latif, D. C. Das, A. K. Barik, and S. Ranjan, "Illustration of demand response supported co-ordinated system performance evaluation of YSGA optimized dual stage PIFOD-(1+PI) controller employed with wind-tidal-biodiesel based independent two-area interconnected microgrid system," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 6, pp. 1074–1086, Apr. 2020.

[20] A. Latif, S. M. S. Hussain, D. C. Das, and T. S. Ustun, "State-of-the-art of controllers and soft computing techniques for regulated load frequency management of single/multi-area traditional and renewable energy based power systems," *Appl. Energy*, vol. 266, May 2020, Art. no. 114858.

[21] Z. Zhao, P. Yang, J. M. Guerrero, Z. Xu, and T. C. Green, "Multiple-Time-Scales hierarchical frequency stability control strategy of medium-voltage isolated microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 8, pp. 5974–5991, Aug. 2016.

[22] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.

[23] B. P. Padhy, S. C. Srivastava, and N. K. Verma, "A wide-area damping controller considering network input and output delays and packet drop," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 1, pp. 166–176, Jan. 2017.

[24] L. D. Philipp, A. Mahmood, and B. L. Philipp, "An improved refinable rational approximation to the ideal time delay," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 46, no. 5, pp. 637–640, May 1999.

[25] I. Nagrath, *Control Systems Engineering*. Daryaganj, New Delhi: New Age International, 2006.

[26] C.-H. Liu and Y.-Y. Hsu, "Design of a self-tuning PI controller for a STATCOM using particle swarm optimization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 702–715, Feb. 2010.

[27] C.-F. Juang and C.-F. Lu, "Load-frequency control by hybrid evolutionary fuzzy PI controller," *IEE Proc.-Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 153, no. 2, pp. 196–204, 2006.

[28] D. K. Frederick and J. Chow, *Feedback Control Problems Using MATLAB and the Control System Toolbox*. Seattle, WA, USA: Brooks/Cole Publishing, 1999.

[29] T. P. Krauss, L. Shure, and J. Little, *Signal Processing Toolbox for Use With MATLAB: User's Guide*. Natick, MA, USA: MathWorks, 1994.

[30] T. Coleman, M. A. Branch, and A. Grace, "Optimization toolbox," in *For Use With MATLAB. User's Guide for MATLAB Version 2, Relaese II*, vol. 5. Natick, MA, USA: MathWorks, 1999.

[31] M. Liu, I. Dassios, G. Tzounas, and F. Milano, "Stability analysis of power systems with inclusion of realistic-modeling WAMS delays," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 627–636, Jan. 2019.

PHOOMPAT JAMPEETHONG (Member, IEEE) received the B.Eng. and M.Eng. degrees in electrical engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 2003 and 2007, respectively, where he is currently pursuing the D.Eng. degree in electrical engineering. His research interests include alternative energy, electric vehicle, battery energy storage systems, and power electronics.

SURIN KHOMFOI (Senior Member, IEEE) was born in Thailand. He received the B.Eng. and M.Eng. degrees in electrical engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 1996 and 2000, respectively, and the Ph.D. degree in electrical engineering from The University of Tennessee, Knoxville, TN, USA, in 2007.

Since December 1997, he has been a Lecturer with the Department of Electrical Engineering, KMITL, where he is currently an Associate Professor. His current research interests include multi-level power converters, renewable energy applications, fault diagnosis, power quality, and smart grids. He is a member of the Eta Kappa Nu Honor Society. He was a recipient of the Academic Scholarship Awards, including the Full Academic Scholarship for his B.Eng., M.Eng., and Ph.D. studies from the Energy Policy and Planning Office (EPPO), Ministry of Energy, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายภูมิพัฒน์ จำปีทอง
วัน เดือน ปีเกิด	8 พฤศจิกายน 2518
ที่อยู่	22/193 ซอยเลียบคลองสอง 23 แขวงสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การติดตั้งใช้งานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า 2) โปรแกรม PLC 3) การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า 4) วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] Jampeethong P. and Khomfoi S., "An EV Quick Charging Station Using a Pulse Frequency Current Control Technique," **12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2015),** Hua Hin, Thailand, June 2015.

[2] Jampeethong P. and Khomfoi S., "An EV Quick Charger Based on CHAdeMO Standard with Grid-support Function," **18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015),** Pattaya Thailand, 25-28 October 2015.

[3] Jampeethong P. and Khomfoi S., "Coordinated Control of Electric Vehicles and Renewable Energy Sources for Frequency Regulation in Microgrids," **IEEE Access,** vol. 8, pp. 141967–141976, 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้