การพัฒนาระบบแคนโอเพนร่วมกับระบบอัดประจุ สำหรับแบตเตอรี่ เอ็นเอ็มซี แรงดันต่ำ

นายณัฐพล ดลเจริญนนท์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

DEVELOPMENT OF A CANopen-BASED BATTERY CHARGING SYSTEM FOR LOW VOLTAGE NMC BATTERIES

NATTHAPON DONJAROENNON



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

การพัฒนาระบบแคนโอเพนร่วมกับระบบอัดประจุ สำหรับแบตเตอรี่
เอ็นเอ็มซี แรงดันต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รศ. ดร.กาณฑ์ เกิดชื่น)
ประธานกรรมการ

.....

(ผศ. ดร.อุเทน ลีตน)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....

(ศ. ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)
กรรมการ

.....

(รศ. ดร.กีรติ ชยะกุลศิริ)
กรรมการ

.....

(ผศ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)
กรรมการ

.....

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ

.....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ณัฐพล ดลเจริญนนท์ : การพัฒนาระบบแคนโอเพนร่วมกับระบบอัดประจุ สำหรับแบตเตอรี่เอ็นเอ็มซี แรงดันต่ำ (DEVELOPMENT OF A CANopen-BASED BATTERY CHARGING SYSTEM FOR LOW VOLTAGE NMC BATTERIES)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีตน, 144 หน้า

คำสำคัญ : การเลือกโปรไฟล์การชาร์จ/แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดเอ็นเอ็มซีแรงดันต่ำ/ระบบชาร์จแบบฟิกส์ซีซี-ซีวี/การสื่อสารแคนโอเพน/การติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินสมรรถนะของสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แรงดันต่ำ โดยบูรณาการการสื่อสารและการควบคุมในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) เพื่อให้สามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่านระบบชาร์จแบบฟิกส์ซีซี-ซีวีได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และเป็นเชิงกำหนด โดยปราศจากการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน เพื่อลดความผิดพลาดจากมนุษย์และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โปรโตคอล CANopen ในการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ผ่าน CAN Identifier (CAN ID) สำหรับแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ 4 ระดับ ได้แก่ 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A โดยข้อมูลถูกส่งผ่าน MQTT ไปยังแพลตฟอร์ม Node-RED เพื่อประมวลผลและเลือกชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดไว้ล่วงหน้า จากนั้นส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยังระบบควบคุม CC-CV ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ข้อมูลด้านอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับถูกจัดเก็บผ่าน Google Sheets เพื่อวิเคราะห์พลังงานและต้นทุนการชาร์จ ขณะที่ข้อมูลด้านเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงถูกจัดเก็บใน InfluxDB และแสดงผลผ่าน Grafana สำหรับการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ ผลการทดลองเชิงระบบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างถูกต้อง มีความเสถียรในการควบคุม และสามารถติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แพลตฟอร์มเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา ณัฐพล ดลเจริญนนท์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

NATTHAPON DONJAROENNON : DEVELOPMENT OF A CANopen-BASED BATTERY CHARGING SYSTEM FOR LOW VOLTAGE NMC BATTERIES.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. UTHEN LEETON, Ph.D., 144 PP.

Keywords: CHARGING PROFILE SELECTION/LOW-VOLTAGE NMC BATTERY/FIXED CC-CV CHARGING SYSTEM/CANOPEN COMMUNICATION/REAL-TIME DATA MONITORING

This research aims to design, develop, and evaluate the performance of a charging profile selection architecture for low-voltage Nickel Manganese Cobalt (NMC) lithium-ion batteries by integrating communication and control mechanisms at the execution layer. The proposed architecture enables accurate, deterministic, and operator-independent charging profile selection through a fixed Constant Current–Constant Voltage (Fixed CC-CV) charging system, thereby reducing human-induced configuration errors and enhancing overall system reliability. In this study, the CANopen protocol is employed to identify battery-specific parameters through the Controller Area Network Identifier (CAN ID) for four low-voltage NMC battery configurations, namely 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A, and 72V 15A. The identified battery information is transmitted via MQTT to the Node-RED platform for parameter processing and predefined charging profile selection. Subsequently, control commands are delivered through Modbus RTU to the fixed CC-CV charging system, enabling battery-specific voltage and current regulation. The alternating-current input data are recorded through Google Sheets for energy consumption analysis and charging cost estimation, whereas direct-current output data are stored in InfluxDB and visualized through Grafana for real-time data monitoring. Experimental system-level results demonstrate that the proposed architecture can accurately select charging profiles, maintain stable control performance, and provide efficient real-time monitoring under a unified platform, confirming its applicability for multi-configuration low-voltage NMC battery charging systems.

School of Electrical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature ณัฐพล ดลรังนนท์
Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำเชิงวิชาการที่ลึกซึ้ง ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนการให้คำปรึกษาและการสนับสนุนอย่างต่อเนื่องในทุกขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาแนวคิด การวิเคราะห์ปัญหา และการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้สละเวลาในการพิจารณา ให้ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นอันทรงคุณค่า ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ถูกต้อง และมีคุณภาพทางวิชาการยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องที่ได้ถ่ายทอดองค์ความรู้ ให้คำแนะนำ และสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงาน ห้องปฏิบัติการ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกภาคส่วนที่ได้ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และทรัพยากรที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการอำนวยความสะดวกในการทดสอบ การเก็บรวบรวมข้อมูล และการดำเนินการทดลอง ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จและความก้าวหน้าไปอย่างมีประสิทธิภาพของงานวิจัยฉบับนี้

ณัฐพล ดลเจริญนนท์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูป ..... ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย 4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
1.7 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 5
1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 6
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8
2.1 บทนำ 8
2.2 หลักการพื้นฐานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แรงดันต่ำ 9
2.3 หลักการชาร์จแบตเตอรี่แบบฟิกส์ CC-CV 11
2.4 ระบบสื่อสาร CAN และ CANopen สำหรับระบบแบตเตอรี่ 14
2.5 ระบบสื่อสารและการควบคุมในระดับ Supervisory Layer 16
2.6 การจัดเก็บและติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ 18
2.7 การคำนวณพลังงานและต้นทุนการชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ 21

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 24
2.9 การวิเคราะห์ช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap Analysis) 34
2.10 สรุป 36
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 37
3.1 บทนำ 37
3.2 สถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ 39
3.3 การพัฒนาเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV สำหรับระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จ 42
3.4 การสื่อสารข้อมูลระหว่างแบตเตอรี่และตู้ชาร์จผ่าน CANopen และ MQTT 49
3.5 โครงสร้างการแลกเปลี่ยนข้อมูลสำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จ 55
3.6 การพัฒนาระบบควบคุมด้วย Mini PLC-H3 (redPLC or Node-RED) 56
3.7 สรุป 71
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล 72
4.1 บทนำ 72
4.2 การตั้งค่าการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ 73
4.3 การตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen 74
4.4 การส่งข้อมูล CAN ID ไปยัง Node-RED และการควบคุมการชาร์จผ่าน MQTT 76
4.5 การเก็บข้อมูลและการแสดงผลของระบบ 79
4.6 สรุปผลการทดลอง 92
5 บทสรุป 93
5.1 สรุปผลงานวิจัย 93
5.2 ข้อเสนอแนะข้อจำกัดของงานวิจัย 94
5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาในอนาคต 94
รายการอ้างอิง 96
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก 101
ภาคผนวก ข 138
ประวัติผู้เขียน 144

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบชาร์จ 41
3.2 การกำหนด CAN ID สำหรับแบตเตอรี่แต่ละระบบ 44
3.3 การเชื่อมต่อ Diff Switch กับ GPIO ของ ESP32 47
3.4 การเชื่อมโยง CAN ID กับระบบรีเลย์ควบคุม 48
3.5 การแมปรีจิสเตอร์ Modbus RTU สำหรับตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ของ PM2200 ...64
3.6 การแมปรีจิสเตอร์ Modbus RTU สำหรับตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ของ PZEM-017 67
4.1 ผลการตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จจากค่า CAN ID 75
4.2 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วง On-Peak ในแต่ละรอบชาร์จ 82
4.3 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วง Off-Peak ในแต่ละรอบชาร์จ 82
4.4 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องชาร์จเดลต้าชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละโปรไฟล์..... 91

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 พฤติกรรมแรงดันและกระแสในกระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV 12
2.2 สถาปัตยกรรมการสื่อสารและการควบคุมของระบบแบตเตอรี่ผ่านเครือข่าย CAN 16
2.3 อัตราค่าไฟฟ้าแบบ Time of Use (TOU) ประเภทที่ 1.3 22
3.1 สถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC ผ่าน CANopen - Modbus RTU 38
3.2 โครงสร้างระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen และ Modbus RTU 40
3.3 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบควบคุมภายในตู้ชาร์จ 42
3.4 วงจรควบคุมแรงดันและกระแสของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV 43
3.5 การเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน Relay RS485 สำหรับระบบฟิกส์ CC-CV 43
3.6 การรับและส่ง CAN ID ระหว่างกล่องแบตเตอรี่ NMC และตู้ชาร์จผ่าน CANopen 45
3.7 บอร์ดสื่อสาร CANopen สำหรับระบุแบตเตอรี่และเลือกโปรไฟล์การชาร์จ 46
3.8 การกำหนดค่าแรงดันและกระแสของระบบฟิกส์ CC-CV ผ่าน Diff Switch 47
3.9 การส่งข้อมูล CANopen จากกล่องแบตเตอรี่ผ่าน ESP32 ผ่านสาย CAN-high/CAN-low.....50
3.10 การรับข้อมูล CANopen ที่ตู้ชาร์จผ่าน ESP32 ผ่านสาย CAN-high/CAN-low 52
3.11 การส่งข้อมูล CAN ID, Voltage และ Current ไปยัง Node-RED ผ่าน MQTT.....54
3.12 การสื่อสารข้อมูลจาก CAN Bus สู่ระบบ redPLC-NodeRED ผ่านโปรโตคอล MQTT 56
3.13 การเชื่อมต่อ Mini PLC-H3 ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันฝั่งกำลังของเครื่องชาร์จ 57
3.14 การพัฒนาระบบ Supervisory Control บน Node-RED สำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จ .59
3.15 การควบคุม Relay RS485 สำหรับเลือกโปรไฟล์ฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้า 60
3.16 ลำดับการ Trigger Relay RS485 ภายหลังการคัดแยก CAN ID สำหรับฟิกส์ค่า CC-CV ..61
3.17 การติดตามพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ด้วย PM2200 ผ่าน Modbus RTU.....63
3.18 การอ่านและบันทึกข้อมูลพลังงานจาก PM2200 บน Node-RED.....65
3.19 การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ด้วย PZEM-017 ร่วมกับ Shunt Resistor 50A.....66
3.20 การจัดเก็บข้อมูลพลังงานฝั่ง DC จาก PZEM-017 ลงใน InfluxDB ผ่าน Node-RED.....68
3.21 ระบบฐานข้อมูล InfluxDB สำหรับจัดเก็บข้อมูลแบบ Time-series ของระบบชาร์จ 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.22 การกำหนด Data Source ของ Grafana สำหรับเชื่อมต่อฐานข้อมูล InfluxDB 70
4.1 การตั้งค่าการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ 74
4.2 ผลการตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ 76
4.3 การส่งข้อมูล CAN ID จาก ESP32 ไปยัง Node-RED ผ่านโปรโตคอล MQTT 78
4.4 การจัดเก็บข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC จาก PM2200 ลงใน Google Sheets 80
4.5 การแสดงผลข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ผ่าน Grafana Dashboard ของระบบ 72V 15A .. 81
4.6 ตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลแรงดันและกระแสในฐานข้อมูล InfluxDB จากมิเตอร์ฝั่ง DC 83
4.7 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 72V15A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana 84
4.8 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 72V 15A แสดงผ่าน Grafana 85
4.9 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 24V5A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana 86
4.10 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 24V5A แสดงผ่าน Grafana 86
4.11 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 48V5A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana 87
4.12 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 48V5A แสดงผ่าน Grafana 87
4.13 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 60V5A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana 88
4.14 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 60V5A แสดงผ่าน Grafana 88
4.15 พฤติกรรมกระแสไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่โปรไฟล์ 60V 5A 89
4.16 พฤติกรรมการ Balancing ของแบตเตอรี่และข้อมูลแรงดันรายเซลล์จากระบบ BMS 90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

EV	=	Electric Vehicle
NMC	=	Nickel Manganese Cobalt
BMS	=	Battery Management System
CC	=	Constant-Current
CV	=	Constant-Voltage
CAN	=	Controller Area Network
RTU	=	Remote Terminal Unit
ID	=	Identifier
MQTT	=	Message Queuing Telemetry Transport
redPLC	=	Node-Red with PLC
PLC	=	Programmable Logic Controller
PZEM	=	Peacefair Electronic Meter
PM	=	Power Meter
V	=	Voltage
A	=	Ampere
OP	=	Off-Peak Energy Consumption
P	=	Peak Energy Consumption

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน การเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานของโลก (Global Energy Transition) ได้ส่งผลให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy Storage Systems) มีบทบาทสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในระบบพลังงานหมุนเวียน ระบบสำรองพลังงาน และระบบควบคุมทางอุตสาหกรรม โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery) ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง ประสิทธิภาพเชิงพลังงานดี และสามารถรองรับการทำงานที่ต้องการความต่อเนื่องและความน่าเชื่อถือสูง โดยเฉพาะแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Nickel Manganese Cobalt: NMC) ซึ่งมีความสมดุลระหว่างความหนาแน่นพลังงาน ความสามารถในการจ่ายกำลัง และเสถียรภาพทางความร้อน ส่งผลให้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบกักเก็บพลังงานสมัยใหม่ อย่างไรก็ตาม แม้แบตเตอรี่ชนิด NMC จะมีสมรรถนะที่โดดเด่น แต่ประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน และความปลอดภัยของแบตเตอรี่ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการชาร์จเป็นสำคัญ โดยเฉพาะการกำหนดพารามิเตอร์การชาร์จให้เหมาะสมกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละระบบ เช่น ระดับแรงดัน กระแส ความจุ และค่าความต้านทานภายใน ซึ่งหากกำหนดค่าที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดความร้อนสะสม ประสิทธิภาพการชาร์จลดลง และเร่งการเสื่อมสภาพของเซลล์แบตเตอรี่ในระยะยาว

จากการศึกษาทางด้านไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ พบว่ากระบวนการชาร์จมีผลโดยตรงต่อ Charge transfer kinetics, Polarization behavior, Thermal distribution และ Electrochemical degradation ภายในเซลล์แบตเตอรี่ โดยเฉพาะการชาร์จแบบกระแสคงที่–แรงดันคงที่ (Constant Current–Constant Voltage: CC-CV) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความเรียบง่ายและมีเสถียรภาพในการควบคุม อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ที่มีระดับแรงดันและพิกัดกระแสแตกต่างกัน เช่น 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ย่อมมีคุณลักษณะการตอบสนองทางไฟฟ้าและข้อจำกัดในการชาร์จที่แตกต่างกัน ดังนั้น การใช้พารามิเตอร์การชาร์จแบบเดียวกันกับแบตเตอรี่ทุกระบบอาจไม่สามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดได้ และยังเพิ่มความเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนจากการตั้งค่าของผู้ปฏิบัติงาน การเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบได้อย่างถูกต้อง โดยปราศจากการตั้งค่าจากมนุษย์ จึงเป็น

แนวทางสำคัญในการลดความผิดพลาด เพิ่มความถูกต้อง และยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จแบตเตอรี่

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โปรโตคอล CANopen เพื่อกำหนดและระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ผ่าน CAN Identifier (CAN ID) ซึ่งทำหน้าที่เป็นข้อมูลอัตลักษณ์เฉพาะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ สำหรับแบตเตอรี่ทั้ง 4 ระดับ แรงดันและกระแส เมื่อระบบตรวจจับ CAN ID ของแบตเตอรี่ได้ ข้อมูลจะถูกส่งไปยังแพลตฟอร์ม Node-RED ผ่านโปรโตคอล MQTT เพื่อทำหน้าที่ประมวลผลและเลือกชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดไว้ล่วงหน้าสำหรับแบตเตอรี่แต่ละระบบ จากนั้น Node-RED จะส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยังอุปกรณ์ควบคุมการชาร์จ เพื่อเรียกใช้ค่าความต้านทานและพารามิเตอร์ของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV ที่ได้ผ่านการกำหนดและสอบเทียบไว้ล่วงหน้าตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลอินพุตจากระบบเพื่อใช้ในการควบคุมและติดตามสถานะของกระบวนการชาร์จตลอดช่วงการทำงาน

นอกจากนี้ ข้อมูลจากกระบวนการชาร์จ เช่น ค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า พลังงานสะสม และสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ จะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลแบบ Time-Series ผ่าน InfluxDB และแสดงผลแบบเวลาจริงผ่าน Grafana เพื่อใช้ในการติดตาม วิเคราะห์ และประเมินสมรรถนะของระบบอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่างานส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการออกแบบวงจรชาร์จหรือการประเมินสถานะของแบตเตอรี่ในระดับเซลล์เป็นหลัก ขณะที่การบูรณาการระบบระบุชนิดของแบตเตอรี่ผ่าน CANopen การส่งข้อมูลผ่าน MQTT การประมวลผลผ่าน Node-RED และการควบคุมพารามิเตอร์การชาร์จผ่าน Modbus RTU เพื่อรองรับแบตเตอรี่หลายพิกัดภายใต้แพลตฟอร์มเดียวกัน ยังมีการศึกษาอยู่ในวงจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแพลตฟอร์มอัจฉริยะสำหรับการระบุชนิดของแบตเตอรี่และเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างถูกต้องโดยปราศจากการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน เพื่อช่วยลดความผิดพลาดจากมนุษย์ เพิ่มความถูกต้องของการเลือกพารามิเตอร์การชาร์จ และเพิ่มประสิทธิภาพ ความยืดหยุ่น และความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ในงานประยุกต์ด้านพลังงานยุคยานยนต์สมัยใหม่

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC โดยบูรณาการระบบสื่อสารและการควบคุมในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) เพื่อให้สามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบกระแสคงที่–แรงดันคงที่ (CC-CV) ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) ทั้งนี้ งานวิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์ย่อยดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC โดยใช้โปรโตคอล CANopen ในการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่และกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบ

1.2.2 เพื่อพัฒนากลไกการควบคุมในระดับปฏิบัติการ โดยประยุกต์ใช้ Node-RED, MQTT และ Modbus RTU สำหรับการเลือกและควบคุมพารามิเตอร์การชาร์จแบบ CC-CV ได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่อง

1.2.3 เพื่อทดสอบ ประเมินประสิทธิภาพ และติดตามผลการทำงานของระบบชาร์จแบบ CC-CV แบบเวลาจริง โดยพิจารณาด้านความถูกต้อง ความเสถียร และความน่าเชื่อถือของระบบ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

งานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานว่า การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC โดยบูรณาการการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ผ่านโปรโตคอล CANopen ร่วมกับกลไกการประมวลผลและควบคุมในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) ภายใต้ระบบสื่อสารแบบเชิงกำหนด (Deterministic Communication) สามารถเลือกพารามิเตอร์การชาร์จแบบ CC-CV ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบได้อย่างถูกต้องโดยปราศจากการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากมนุษย์ เพิ่มความแม่นยำในการควบคุมค่ากระแสและแรงดัน เพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จ และยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบ โดยสามารถยืนยันผลได้จากการทดลองจริงและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณของค่ากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า พลังงานที่ถ่ายโอน และสมรรถนะของกระบวนการชาร์จแบบเวลาจริงภายใต้ NMC หลายพิกัดการทำงาน

1.4 ข้อจำกัดเบื้องต้น

1.4.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้สถาปัตยกรรมระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC โดยใช้เครื่องชาร์จแบบโปรแกรมได้ ซึ่งมีช่วงการทำงานของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0–120 V และรองรับกระแสไฟฟ้าสูงสุด 0–30 A ภายใต้กลยุทธ์การชาร์จแบบ CC-CV ตามขอบเขตการทำงานที่กำหนดไว้ในการวิจัย

1.4.2 การระบุและเลือกโปรไฟล์การชาร์จดำเนินการผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับโปรโตคอล CANopen โดยใช้ CAN Identifier เป็นกลไกหลักในการกำหนดพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมกระบวนการสื่อสารแบบ negotiation หรือการแลกเปลี่ยนข้อมูลเชิงโต้ตอบระหว่างระบบกับแบตเตอรี่หรือระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ระหว่างการทำงาน

1.4.3 การควบคุมค่ากระแสและแรงดันของแต่ละโปรไฟล์ดำเนินการในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) โดยอาศัยกลไกการควบคุมแบบฮาร์ดแวร์ผ่านระบบ CC-CV และการสื่อสารผ่าน Modbus RTU ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมถูกกำหนดและสอบเทียบไว้ล่วงหน้า (Predefined and Calibrated Parameters) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำงานของระบบ

1.4.4 การทดสอบระบบดำเนินการกับชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ขนาด 3.7 V 25 Ah ภายใต้หลายระดับแรงดันและกระแสตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงของระบบชาร์จ โดยขอบเขตของงานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในระยะยาว (Long-term Degradation)

1.4.5 การวิเคราะห์ผลมุ่งเน้นการประเมินความถูกต้องของการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ความเสถียรของพฤติกรรม CC-CV ความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสาร และความสอดคล้องของพลังงานที่ถ่ายโอนระหว่างด้านอินพุตและเอาต์พุต รวมถึงการติดตามผลการทำงานแบบเวลาจริง โดยไม่ครอบคลุมการออกแบบวงจรกำลังของเครื่องชาร์จหรือโครงสร้างภายในของระบบ BMS

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 งานวิจัยนี้ครอบคลุมการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC โดยมุ่งเน้นการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ผ่านโปรโตคอล CANopen และใช้ CAN Identifier (CAN ID) เป็นกลไกหลักในการจำแนกแบตเตอรี่แต่ละระบบ เพื่อเชื่อมโยงกับการเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบ CC-CV ในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) สำหรับแบตเตอรี่ 4 ระดับการทำงาน ได้แก่ 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ทั้งนี้ ขอบเขตของงานวิจัยไม่ครอบคลุมการออกแบบวงจรกำลังของเครื่องชาร์จ หรือการพัฒนาอัลกอริทึมการชาร์จรูปแบบใหม่นอกเหนือจาก CC-CV

1.5.2 งานวิจัยนี้ครอบคลุมการพัฒนากลไกการประมวลผลและควบคุมในระดับปฏิบัติการโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับการสื่อสารผ่าน CANopen, MQTT, Node-RED และ Modbus RTU เพื่อเลือกและเรียกใช้ชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดและสอบเทียบไว้ล่วงหน้าสำหรับแบตเตอรี่แต่ละระบบ โดยค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการชาร์จถูกกำหนดแบบคงที่ตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่ และไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าแบบไดนามิกระหว่างการทำงาน ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ครอบคลุมการเจรจาข้อมูล (Negotiation) ระหว่างแบตเตอรี่กับ BMS หรือการพัฒนาโครงสร้างภายในของระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่

1.5.3 งานวิจัยนี้ครอบคลุมการติดตาม ตรวจวัด และประเมินสมรรถนะของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV โดยทำการจัดเก็บข้อมูลด้านอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Input) ผ่าน Google Sheets เพื่อใช้ในการบันทึกพลังงานไฟฟ้าและคำนวณต้นทุนการชาร์จในแต่ละครั้ง และจัดเก็บข้อมูล

ด้านเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง (DC Output) ผ่าน InfluxDB พร้อมแสดงผลแบบเวลาจริงผ่าน Grafana เพื่อประเมินความถูกต้อง ความเสถียร และความสอดคล้องของพลังงานที่ถ่ายโอนในแต่ละระบบ ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ครอบคลุมการทดสอบอายุการใช้งานระยะยาว การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพเชิงไฟฟ้าเคมีของเซลล์แบตเตอรี่ หรือการวิเคราะห์ทางสถิติขั้นสูงของพฤติกรรมการเสื่อมสภาพ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้สถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC ที่สามารถบูรณาการการสื่อสารผ่าน CANopen เข้ากับการควบคุมในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่ที่มีความแม่นยำ เสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือสูง

1.6.2 ได้กลไกการควบคุมและเลือกพารามิเตอร์การชาร์จแบบ CC-CV ผ่านแพลตฟอร์มการประมวลผลและการสื่อสารที่สามารถกำหนดค่าการทำงานได้อย่างเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) ลดความคลาดเคลื่อนจากการตั้งค่าของผู้ปฏิบัติงานและลดความผิดพลาดในการเลือกพารามิเตอร์การชาร์จ

1.6.3 ได้ระบบต้นแบบสำหรับการระบุชนิดของแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดันและกระแสผ่าน CAN Identifier (CAN ID) ซึ่งสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบได้อย่างถูกต้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

1.6.4 ได้ข้อมูลเชิงทดลองจากการติดตามและประเมินพฤติกรรมการชาร์จแบบ CC-CV แบบเวลาจริง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ความถูกต้อง ความเสถียร ความสอดคล้องของพลังงานที่ถ่ายโอน และสมรรถนะโดยรวมของระบบชาร์จในแต่ละระดับการทำงาน

1.6.5 ได้องค์ความรู้และแนวทางในการพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC ที่บูรณาการการสื่อสาร การควบคุม และการติดตามผลข้อมูลแบบเวลาจริง ซึ่งสามารถต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้งานในระบบกักเก็บพลังงานและระบบพลังงานอัจฉริยะในอนาคต

1.7 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีจุดเด่นที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.7.1 เสนอแนวทางการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ NMC ผ่านโปรโตคอล CANopen โดยใช้ CAN Identifier (CAN ID) เป็นกลไกหลักในการจำแนกแบตเตอรี่แต่ละระบบ เพื่อเชื่อมโยงกับการเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบ CC-CV ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่หลายพิกัดภายใต้แพลตฟอร์มเดียวกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.7.2 พัฒนากลไกการเลือกโปรไฟล์การชาร์จในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) โดยบูรณาการ ESP32 ร่วมกับการสื่อสารผ่าน MQTT, Node-RED และ Modbus RTU เพื่อให้สามารถเลือกและเรียกใช้ชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) โดยปราศจากการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน

1.7.3 ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบควบคุมแบบแยกชั้นระหว่าง supervisory layer และ execution layer อย่างชัดเจน โดยใช้แพลตฟอร์ม Node-RED ในการประมวลผลและบริหารจัดการข้อมูล และใช้ฮาร์ดแวร์ควบคุมในระดับปฏิบัติการสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV

1.7.4 พัฒนากลไกการควบคุมแบบ safety-by-design โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์การชาร์จผ่านฮาร์ดแวร์ที่ผ่านการสอบเทียบไว้ล่วงหน้า ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดระหว่างการทำงาน ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากมนุษย์ และเพิ่มความปลอดภัยในการควบคุมกระบวนการชาร์จ

1.7.5 บูรณาการระบบติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการชาร์จแบบเวลาจริง โดยจัดเก็บข้อมูลด้านพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน Google Sheets สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและต้นทุนการชาร์จ และจัดเก็บข้อมูลด้านพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน InfluxDB พร้อมแสดงผลผ่าน Grafana ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินสมรรถนะของระบบได้อย่างต่อเนื่องและครบวงจร

1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย สมมติฐานการวิจัย ข้อจำกัดเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และโครงสร้างของรายงานวิจัย เพื่อกำหนดกรอบแนวคิดและทิศทางของการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC กระบวนการชาร์จแบบ CC-CV ระบบสื่อสาร CANopen, MQTT และ Modbus RTU รวมถึงเทคโนโลยีการจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลแบบเวลาจริง เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย นำเสนอขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC ครอบคลุมการระบุพารามิเตอร์ผ่าน CANopen การประมวลผลข้อมูลผ่าน MQTT และ Node-RED การควบคุมผ่าน Modbus RTU และการออกแบบระบบจัดเก็บข้อมูลสำหรับการทดสอบระบบ

บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล นำเสนอผลการทดลองของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยครอบคลุมผลการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ความถูกต้องของการควบคุมแบบ CC-CV ความเสถียรของระบบสื่อสาร และการติดตามข้อมูลแบบเวลาจริงผ่าน Grafana Dashboard เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ สรุปผลการดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด อภิปรายผล พร้อมนำเสนอข้อจำกัดของงานวิจัยและแนวทางในการพัฒนาในอนาคต

ภาคผนวก ประกอบด้วยวารสารวิชาการที่ได้ตีพิมพ์และตัวอย่างโค้ดที่ใช้สำหรับโปรโตคอลการสื่อสาร CANopen

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไฟฟ้าได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบพลังงานสมัยใหม่ ทั้งในภาคยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานแบบกระจายตัว ระบบพลังงานหมุนเวียน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการพลังงาน ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานคาร์บอนต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Tarascon, 2001 ได้รายงานว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความได้เปรียบทั้งด้านความหนาแน่นพลังงาน ประสิทธิภาพการชาร์จ–คายประจุ อัตราการคายประจุเองต่ำ และอายุการใช้งานที่ยาวนาน เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดอื่น ส่งผลให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนกลายเป็นเทคโนโลยีหลักของระบบกักเก็บพลังงานในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เมื่อรูปแบบการประยุกต์ใช้งานมีความหลากหลายมากขึ้น การกำหนดพารามิเตอร์การทำงานให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญ โดยเฉพาะในกระบวนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบพลังงาน

ภายใต้เทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ชนิด NMC ได้รับความสนใจอย่างมากจากทั้งภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัย เนื่องจากสามารถสร้างสมดุลระหว่างความหนาแน่นพลังงาน ความสามารถในการจ่ายกำลัง ความเสถียรทางความร้อน และอายุการใช้งานได้อย่างเหมาะสม โดย Scrosati, 2011 ได้รายงานว่าวัสดุแคโทดชนิด NMC มีศักยภาพสูงในการรองรับการใช้งานที่ต้องการทั้งพลังงานและกำลังไฟฟ้า พร้อมทั้งสามารถตอบสนองต่อสภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติดังกล่าวทำให้แบตเตอรี่ NMC ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบกักเก็บพลังงานหลายระดับแรงดัน โดยเฉพาะระบบแรงดันต่ำที่มีความแตกต่างของค่าพิกัดแรงดันกระแส และความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อความจำเป็นในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ

แม้ว่า CC-CV จะยังคงเป็นแนวทางมาตรฐานสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากสามารถควบคุมสมดุลระหว่างอัตราการชาร์จ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน และความปลอดภัยของเซลล์ได้อย่างเหมาะสม แต่ Notten, 2007 ได้รายงานว่าประสิทธิภาพของกระบวนการชาร์จไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการชาร์จเพียงอย่างเดียว หากยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุม เช่น ค่าแรงดันสิ้นสุดการชาร์จ ค่ากระแสคงที่ อัตราการลดลงของกระแสในช่วง CV และเงื่อนไขการสิ้นสุดการชาร์จ หากมีการกำหนดค่าที่ไม่สอดคล้องกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการชาร์จ ความสมดุลของเซลล์ และอายุการใช้งานในระยะยาว ดังนั้น การเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของแบตเตอรี่จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จ

ในปัจจุบัน ระบบชาร์จแบตเตอรี่สมัยใหม่ได้เริ่มบูรณาการระบบสื่อสารอุตสาหกรรมร่วมกับระบบควบคุมและการติดตามข้อมูล เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการกำหนดพารามิเตอร์ ลดความคลาดเคลื่อนจากผู้ปฏิบัติงาน และเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ โดย Kim, 2021 ได้รายงานว่าการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารแบบ Distributed communication ร่วมกับแพลตฟอร์มการประมวลผลและฐานข้อมูลแบบ Time-series สามารถเพิ่มความต่อเนื่องเชิงกำหนดของระบบ ลดความล่าช้าในการตอบสนอง และเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมอุปกรณ์ภาคสนาม แนวทางดังกล่าวจึงมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่หลายพิกัดภายใต้แพลตฟอร์มเดียว โดยเฉพาะระบบที่ต้องอาศัยข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จอย่างถูกต้องและลดความผิดพลาดจากการตั้งค่าด้วยมนุษย์

ดังนั้น บทนี้จึงนำเสนอทฤษฎีพื้นฐาน เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่ผ่านมาในด้านแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ การชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ระบบสื่อสารอุตสาหกรรม และการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานทางวิชาการในการวิเคราะห์ช่องว่างขององค์ความรู้ และนำไปสู่การพัฒนาแนวทางการเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือในบทถัดไป

2.2 หลักการพื้นฐานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แรงดันต่ำ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในระบบพลังงานสมัยใหม่ เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง ประสิทธิภาพการชาร์จ–คายประจุที่ดี และสามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิด NMC ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากจากทั้งภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัย เนื่องจากสามารถสร้างสมดุลระหว่างความหนาแน่นพลังงาน ความสามารถในการจ่ายกำลัง ความเสถียรทางความร้อน และอายุการใช้งานได้อย่างเหมาะสม โดย Scrosati, 2011 ได้รายงานว่าวัสดุแคโทดชนิด

NMC มีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบกักเก็บพลังงานที่ต้องการทั้งพลังงานและกำลังไฟฟ้าร่วมกัน นอกจากนี้ ในระบบแบตเตอรี่แรงดันต่ำที่มีความแตกต่างของค่าพิกัดแรงดันกระแส และความจุของแบตเตอรี่ การทำความเข้าใจพฤติกรรมทางไฟฟ้า โครงสร้างภายใน และคุณลักษณะทางพลวัตของแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์สมรรถนะและการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ

2.2.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทำงานบนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของลิเทียมไอออนระหว่างขั้วบวกและขั้วลบผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ในกระบวนการชาร์จและคายประจุ โดย Tarascon, 2001 ได้รายงานว่าระหว่างกระบวนการชาร์จ ลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่จากวัสดุแคโทดไปยังวัสดุแอโนดผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกเพื่อรักษาสมดุลของประจุไฟฟ้า ส่วนในกระบวนการคายประจุ ลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่ย้อนกลับจากแอโนดไปยังแคโทด ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดภายนอก พฤติกรรมดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อสถานะประจุ ความต้านทานภายใน และแรงดันปลายทางของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะและกำหนดเงื่อนไขในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

สมการสถานะประจุ (State of Charge: SOC) หาได้จากสมการที่ (2.1)

$$SOC(t)=SOC_0+\frac{1}{Q_n}\int_0^t I(\Gamma)d\Gamma \tag{2.1}$$

สมการดังกล่าวถูกใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์พฤติกรรมการชาร์จและใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดช่วงการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับสภาวะของแบตเตอรี่

2.2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของ NMC

วัสดุแคโทดชนิด NMC ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสร้างสมดุลระหว่างสมรรถนะด้านพลังงาน กำลังไฟฟ้า และความปลอดภัยในการใช้งาน โดย Manthiram, 2017 ได้รายงานว่าโครงสร้างผลึกแบบ Layered oxide ของ NMC ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแทรกตัวและเคลื่อนที่ของลิเทียมไอออนภายในโครงสร้างผลึก ส่งผลให้สามารถรองรับการชาร์จ–คายประจุซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งมีความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่หลายชนิดในกลุ่มเดียวกัน คุณสมบัติดังกล่าวทำให้แบตเตอรี่ NMC มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในระบบแรงดันต่ำหลายระดับ ซึ่งต้องการความแม่นยำในการกำหนดพารามิเตอร์และการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่สมการพลังงานสะสมหาได้จากสมการที่ (2.2)

$$E=V\times Q \tag{2.2}$$

2.2.3 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของ NMC แรงดันต่ำ

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนาน รวมถึงค่าพิกัดแรงดันและกระแสที่ออกแบบสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน โดย Lu, 2013 ได้รายงานว่าการเชื่อมต่อเซลล์แบบอนุกรมจะส่งผลต่อระดับแรงดันของแบตเตอรี่แพ็ก ขณะที่การเชื่อมต่อแบบขนานจะส่งผลต่อความสามารถในการจ่ายกระแสและความจุรวมของระบบ ดังนั้น การออกแบบแบตเตอรี่แพ็กในช่วงแรงดันต่ำ เช่น 24V, 48V, 60V และ 72V จึงจำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ ค่าพิกัดทางไฟฟ้า และข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญต่อการกำหนดพารามิเตอร์และการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน

สมการแรงดันรวมของแบตเตอรี่แพ็กหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$V_{pack} = N_s \times V_{cell} \tag{2.3}$$

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

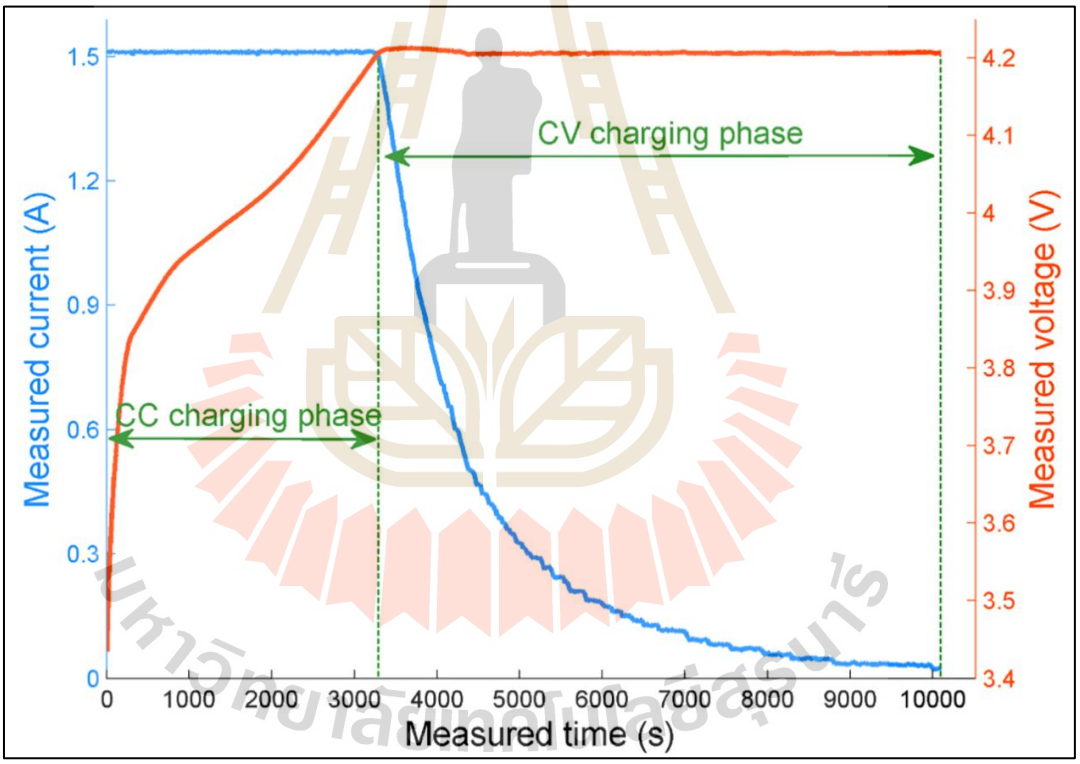
การเลือกโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าพิกัดแรงดันหรือกระแสเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสถานะประจุ ความต้านทานภายใน อุณหภูมิ อัตราการชาร์จ และอายุการใช้งานของเซลล์ โดย Balasingam, 2020 ได้รายงานว่าการกำหนดพารามิเตอร์การชาร์จที่ไม่สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ความไม่สมดุลของเซลล์ และการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร ดังนั้น การวิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าและคุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่จึงเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนการกำหนดเงื่อนไขและการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้มีความถูกต้อง แม่นยำ และสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานจริง

2.3 หลักการชาร์จแบตเตอรี่แบบฟิกส์ CC-CV

กระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีบทบาทสำคัญต่อสมรรถนะ อายุการใช้งาน และความปลอดภัยของระบบ โดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิด NMC ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน กระแส อุณหภูมิ และอัตราการรับประจุ ดังนั้น การกำหนดกลยุทธ์การชาร์จที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาประสิทธิภาพของเซลล์ ลดการเสื่อมสภาพ และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบในระยะยาว โดย Keil, 2016 ได้รายงานว่าการชาร์จแบบ CC-CV ยังคงเป็นแนวทางมาตรฐานสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากสามารถควบคุมสมดุลระหว่างระยะเวลาการชาร์จ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน และความปลอดภัยของเซลล์ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ กระบวนการชาร์จดังกล่าวยังสามารถปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่หลายระดับแรงดัน จึงเหมาะสำหรับการ

ประยุกต์ใช้งานที่ต้องมีการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ

รูปที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมของกระแสและแรงดันระหว่างกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงค่ากระแสชาร์จ และเส้นสีแดงแสดงค่าแรงดันของแบตเตอรี่ตามเวลา จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นของการชาร์จ กระแสจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ ขณะที่แรงดันของแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าแรงดันเป้าหมาย หลังจากนั้นระบบจะเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงแรงดันคงที่ โดยรักษาค่าแรงดันไว้ที่ระดับคงที่ และปล่อยให้ค่ากระแสลดลงตามพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์จนเข้าสู่เงื่อนไขสิ้นสุดการชาร์จ พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและพลวัตของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญต่อการกำหนดเงื่อนไขและการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมแรงดันและกระแสในกระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV

2.3.1 ช่วงกระแสคงที่ (Constant Current Region)

ในช่วงกระแสคงที่ ระบบจะควบคุมให้ค่ากระแสชาร์จมีค่าคงที่ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดล่วงหน้า ขณะที่แรงดันปลายทางของแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสถานะของเซลล์

ความต้านทานภายใน และผลของ Polarization ภายในแบตเตอรี่ โดยพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากสมการแรงดันปลายทางดังนี้

สมการช่วงกระแสคงที่หาได้จากสมการที่ (2.4)

$$V_{(t)}=V_{oc}(SOC)+I_{CC}R_0+V_P(t) \quad (2.4)$$

โดยที่ ค่า polarization voltage สามารถอธิบายเชิงพลวัตได้จากสมการที่ (2.5)

$$\frac{dV_p(t)}{dt}=-\frac{1}{R_PC_P}Vp(t)+\frac{I_{CC}}{C_P} \quad (2.5)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า เมื่อค่ากระแสชาร์จถูกกำหนดคงที่ อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาที่ระบบจะเข้าสู่ช่วงแรงดันคงที่ และเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดโปรไฟล์การชาร์จในแต่ละระดับแรงดัน

2.3.2 ช่วงแรงดันคงที่ (Constant Voltage Region)

เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นถึงค่าแรงดันเป้าหมาย ระบบจะเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงแรงดันคงที่ โดยรักษาค่าแรงดันไว้ที่ระดับคงที่ ขณะที่ค่ากระแสจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามความสามารถในการรับประจุของเซลล์ โดย Berecibar, 2016 ได้รายงานว่าพฤติกรรมการลดลงของกระแสในช่วง CV มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความต้านทานภายใน สุขภาพของแบตเตอรี่ และประสิทธิภาพในการรับประจุของเซลล์ ดังนั้น ข้อมูลในช่วงนี้จึงสามารถใช้ประเมินสมรรถนะของแบตเตอรี่และใช้ประกอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความสัมพันธ์ของแรงดันปลายทางในช่วง CV สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.6)

$$I(t)=I_0e^{-\frac{t}{T}} \quad (2.6)$$

สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่ากระแสจะลดลงแบบ exponential จนถึงค่า Cutoff current ซึ่งถูกใช้เป็นเงื่อนไขสิ้นสุดกระบวนการชาร์จ

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

แม้ว่า CC-CV จะเป็นกลยุทธ์การชาร์จมาตรฐาน แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมในแต่ละระบบไม่สามารถกำหนดค่าเดียวกันได้เสมอไป เนื่องจากแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดันมีความแตกต่างกันทั้งด้านจำนวนเซลล์ ความจุ กระแสสูงสุด ความต้านทานภายใน และข้อจำกัดด้าน

อุณหภูมิ นอกจากนี้ ระยะเวลาการเปลี่ยนผ่านจากช่วง CC ไปยังช่วง CV ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ยังขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเฉพาะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ดังนั้น การกำหนดค่ากระแสคงที่ ค่าแรงดันสิ้นสุดการชาร์จ และเงื่อนไข Cutoff current จึงจำเป็นต้องสอดคล้องกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละระบบ เพื่อให้สามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างถูกต้อง ลดความผิดพลาดในการกำหนดค่า และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จในระยะยาว

2.4 ระบบสื่อสาร CAN และ CANopen สำหรับระบบแบตเตอรี่

ในระบบกักเก็บพลังงานและระบบชาร์จแบตเตอรี่สมัยใหม่ การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างแบตเตอรี่ ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ อุปกรณ์แปลงกำลัง และหน่วยควบคุมส่วนกลาง ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อความถูกต้อง ความต่อเนื่อง และความน่าเชื่อถือของระบบ โดยเฉพาะระบบที่รองรับแบตเตอรี่หลายระดับแรงดัน ซึ่งจำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านแรงดัน กระแส อุณหภูมิ สถานะประจุ และพารามิเตอร์เฉพาะของแบตเตอรี่แบบเวลาจริง ดังนั้น ระบบสื่อสารที่ใช้ในงานลักษณะดังกล่าวจึงจำเป็นต้องรองรับการทำงานแบบ Deterministic communication มีความหน่วงต่ำ และสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้เครือข่าย Controller Area Network หรือ CAN ได้รับการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบยานยนต์ ระบบควบคุมอุตสาหกรรม และระบบกักเก็บพลังงานสมัยใหม่

โดย Bosch, 1991 ได้รายงานว่า CAN protocol ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ควบคุมหลายหน่วยภายในระบบ Distributed control โดยไม่จำเป็นต้องมีหน่วยควบคุมกลาง ทำให้อุปกรณ์แต่ละ node สามารถรับส่งข้อมูลผ่าน Communication bus ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ CAN ยังมีกลไก Arbitration based on message priority ซึ่งใช้ Identifier เป็นตัวกำหนดลำดับความสำคัญของข้อความ ส่งผลให้ข้อมูลที่มีความสำคัญสูงสามารถเข้าถึง Communication bus ได้ก่อน ลดความหน่วงของระบบ และเพิ่มความต่อเนื่องในการตอบสนองแบบเวลาจริง คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ CAN มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในระบบแบตเตอรี่หลายพิกัด ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้มีความถูกต้องและลดความผิดพลาดจากการตั้งค่าด้วยมนุษย์

2.4.1 หลักการสื่อสารของ CAN Bus

CAN bus เป็นระบบสื่อสารแบบ Multi-Master serial communication ซึ่งทุก Node ภายในเครือข่ายสามารถเริ่มต้นการส่งข้อมูลได้โดยอิสระ และใช้กลไก arbitration ในการจัดลำดับสิทธิ์การเข้าถึง Communication bus โดยโครงสร้างพื้นฐานของข้อความใน CAN frame ประกอบด้วย Identifier, Control field, Data field, Cyclic redundancy check และ Acknowledge field ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลได้ระหว่างการรับส่ง

ความสัมพันธ์พื้นฐานของ CAN message สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.7)

$$CAN_{message}=\{ID,DLC,DATA,CRC\} \quad (2.7)$$

ค่าของ Identifier มีผลโดยตรงต่อลำดับความสำคัญของข้อความในระบบ ดังนั้น การกำหนด identifier ที่เหมาะสมจึงมีบทบาทสำคัญต่อระบบควบคุมที่ต้องตอบสนองแบบเวลาจริง

2.4.2 โครงสร้างโปรโตคอล CANopen

แม้ว่า CAN protocol จะสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลในระดับ data link layer ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การประยุกต์ใช้งานในระบบอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีมาตรฐานในระดับ application layer เพื่อให้สามารถกำหนดชนิดของอุปกรณ์ รูปแบบของข้อมูล และกลไกการควบคุมให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน ดังนั้น CANopen จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อขยายความสามารถของ CAN protocol ให้รองรับการใช้งานในระบบ distributed automation

โดย Paret, 2007 ได้รายงานว่า CANopen ใช้ Object dictionary เป็นฐานข้อมูลกลางสำหรับจัดเก็บพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แต่ละ Node ภายในระบบ ซึ่งข้อมูลแต่ละรายการจะถูกกำหนดผ่าน object index และ sub-index อย่างเป็นมาตรฐาน ส่งผลให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างผู้ผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ CANopen ยังรองรับ Process data object และ Service data object สำหรับการสื่อสารทั้งแบบเวลาจริงและแบบ Configuration ซึ่งเหมาะสมต่อระบบแบตเตอรี่ที่ต้องมีทั้งการติดตามสถานะและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทำงาน

2.4.3 CAN Identifier สำหรับการระบุพารามิเตอร์แบตเตอรี่

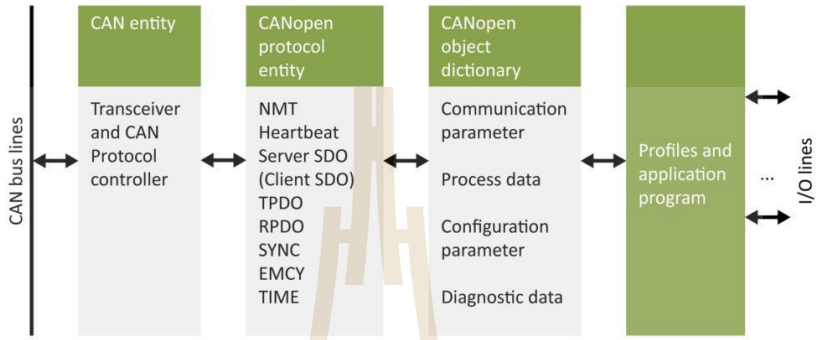
ในระบบ CANopen ค่า CAN Identifier ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงระบุประเภทของข้อความเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้กำหนดตัวตนของอุปกรณ์และลำดับความสำคัญของข้อมูลภายในเครือข่ายได้อีกด้วย โดยการกำหนด Identifier ให้สอดคล้องกับชนิดของแบตเตอรี่หรือระดับแรงดันของระบบ จะช่วยให้หน่วยควบคุมสามารถระบุคุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ เช่น ค่าแรงดันพิกัด ความจุ ค่ากระแสสูงสุด และเงื่อนไขการชาร์จ ได้อย่างถูกต้องก่อนเริ่มกระบวนการควบคุม

แนวทางดังกล่าวมีบทบาทสำคัญต่อระบบแบตเตอรี่หลายพิกัด เนื่องจากช่วยลดความผิดพลาดจากการกำหนดค่าด้วยผู้ปฏิบัติงาน และเพิ่มความน่าเชื่อถือในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของแบตเตอรี่แต่ละระบบ

2.4.4 การประยุกต์ใช้ CANopen ในระบบแบตเตอรี่และระบบชาร์จ

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างสถาปัตยกรรมการสื่อสารของระบบชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า อุปกรณ์แปลงกำลัง ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ และหน่วยควบคุม

ส่วนกลางที่เชื่อมโยงผ่านเครือข่ายการสื่อสารและเครือข่ายกำลังไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าข้อมูลจากแบตเตอรี่สามารถถูกส่งผ่านระบบสื่อสารไปยังหน่วยควบคุมส่วนกลาง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สถานะของแบตเตอรี่ การกำหนดเงื่อนไขการทำงาน และการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมการสื่อสารและการควบคุมของระบบแบตเตอรี่ผ่านเครือข่าย CAN และ Supervisory control

2.5 ระบบสื่อสารและการควบคุมในระดับ Supervisory Layer

ภายหลังจากการระบุพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ผ่านระบบสื่อสารระดับ field layer ข้อมูลที่ได้รับจำเป็นต้องถูกส่งต่อไปยังระบบควบคุมในระดับ Supervisory layer เพื่อใช้ในการประมวลผลการตัดสินใจ และการกำหนดพารามิเตอร์การทำงานของอุปกรณ์ภาคสนามแบบเวลาจริง โดยระบบ Supervisory control มีบทบาทสำคัญต่อการบูรณาการข้อมูลจากอุปกรณ์หลายชนิด การประสานการทำงานระหว่าง Communication protocol ที่แตกต่างกัน และการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่าง Hardware layer กับ Data analytics layer ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบควบคุมในยุค Industrial Internet of Things

โดย Banks, 2014 ได้รายงานว่าการสื่อสารในระดับ Supervisory layer ควรมีคุณสมบัติรองรับ Asynchronous communication, Lightweight protocol และ Publish-subscribe architecture เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดภาระของระบบเครือข่าย และเพิ่มความสามารถในการขยายระบบในอนาคต แนวคิดดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้ MQTT ร่วมกับ Protocol translation และ Supervisory control platform ในระบบอุตสาหกรรมสมัยใหม่ รวมถึงระบบกักเก็บพลังงานและระบบชาร์จแบตเตอรี่

2.5.1 MQTT สำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์

MQTT เป็น Communication protocol ที่ทำงานบนพื้นฐานของ Publish-subscribe model โดยอุปกรณ์ต้นทางจะทำหน้าที่เป็น Publisher ส่งข้อมูลเข้าสู่ Message broker ขณะที่อุปกรณ์ปลายทางจะทำหน้าที่เป็น Subscriber รับข้อมูลตามหัวข้อที่กำหนด ทำให้สามารถแยกส่วนระหว่างผู้ส่งและผู้รับข้อมูลออกจากกันอย่างอิสระ ลดความซับซ้อนของระบบ และเพิ่มความยืดหยุ่นในการขยายเครือข่าย

โดย Banks, 2014 ได้รายงานว่า MQTT ถูกออกแบบให้ใช้ Packet overhead ต่ำ มี Latency ต่ำ และสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลแบบ Near real-time ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้รับการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบ Industrial IoT และ Distributed monitoring

โครงสร้างพื้นฐานของ MQTT communication สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\text{Publisher} \rightarrow \text{Broker} \rightarrow \text{Subscriber} \tag{2.8}$$

โดยข้อมูลจะถูกจัดกลุ่มตามหัวข้อ (Topic) ซึ่งช่วยให้สามารถจัดการข้อมูลจากอุปกรณ์หลายประเภทภายในระบบเดียวกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5.2 Modbus RTU สำหรับการควบคุมพารามิเตอร์การชาร์จ

ภายหลังจากข้อมูลถูกประมวลผลในระดับ Supervisory layer จำเป็นต้องมี Protocol สำหรับส่งคำสั่งควบคุมกลับไปยังอุปกรณ์ภาคสนาม โดย Modbus RTU เป็น protocol ที่ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างเรียบง่าย ความน่าเชื่อถือสูง และสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมหลายประเภทผ่าน Serial communication

โดย Banks, 2014 ได้รายงานว่า Modbus RTU ใช้ Master-slave communication architecture ซึ่ง Master จะทำหน้าที่ร้องขอข้อมูลหรือส่งคำสั่งควบคุมไปยัง Slave device ผ่าน Register-based communication ทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภาคสนามได้อย่างแม่นยำและมีความต่อเนื่องเชิงกำหนด

โครงสร้างข้อมูลของ Modbus RTU สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\text{Frame} = \{\text{Address}, \text{Function}, \text{Data}, \text{CRC}\} \tag{2.9}$$

คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ Modbus RTU เหมาะสมต่อการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบชาร์จที่ต้องการความแม่นยำและความต่อเนื่องในการตอบสนอง

2.5.3 Node-RED สำหรับ Supervisory Control

Node-RED เป็นแพลตฟอร์มแบบ Flow-based programming ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการประมวลผลข้อมูล การแปลง protocol และการบูรณาการข้อมูลจากอุปกรณ์หลากหลายชนิดภายในระบบเดียวกัน โดย O'Leary, 2013 ได้รายงานว่า Node-RED สามารถเชื่อมต่อกับ MQTT, Modbus, REST API และฐานข้อมูลหลายประเภทได้อย่างยืดหยุ่น พร้อมทั้งรองรับการสร้าง Logic control และ Event-driven processing โดยไม่จำเป็นต้องพัฒนา Software ในระดับ Low-level

จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ Node-RED ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบ Supervisory control เนื่องจากสามารถทำหน้าที่เป็น Middleware ระหว่าง Field device, Communication protocol และ Data analytics platform ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเชื่อมโยงข้อมูลจากแบตเตอรี่ไปสู่การกำหนดเงื่อนไขและการเลือกโปรไฟล์การชาร์จในระบบหลายพิกัด

2.5.4 การบูรณาการระบบสื่อสารในระดับ Supervisory Layer

การบูรณาการ MQTT, Modbus RTU และ Supervisory platform ภายในระบบเดียวกัน ทำให้สามารถสร้างโครงสร้างการสื่อสารแบบ Bidirectional communication ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ ข้อมูลจาก Field layer สามารถถูกส่งเข้าสู่ Supervisory layer เพื่อประมวลผล วิเคราะห์ และตัดสินใจ ขณะเดียวกันผลลัพธ์จากการประมวลผลสามารถถูกส่งกลับไปยังอุปกรณ์ภาคสนามเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์การทำงานได้แบบเวลาจริง

แนวทางดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบแบตเตอรี่หลายระดับแรงดัน ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้มีความถูกต้อง ลดความผิดพลาดจากการกำหนดค่าด้วยผู้ปฏิบัติงาน และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบในระยะยาว

2.6 การจัดเก็บและติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์

ในระบบชาร์จแบตเตอรี่สมัยใหม่ การจัดเก็บและติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และการตรวจสอบเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จ เนื่องจากข้อมูลด้านแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะของแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการทำงาน ดังนั้นระบบจัดเก็บข้อมูลจึงจำเป็นต้องรองรับข้อมูลแบบ Time-series ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลพร้อมเวลาอ้างอิง (Timestamp) และรองรับการประมวลผลข้อมูลแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Toshniwal, 2014 ได้รายงานว่าฐานข้อมูลแบบ Time-series ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยเฉพาะ และมีประสิทธิภาพสูงในการจัดเก็บข้อมูลจำนวนมาก การ

Query ข้อมูลตามช่วงเวลา และการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Streaming analytics เมื่อเปรียบเทียบกับ Relational database แบบดั้งเดิม คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ระบบ time-series database ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบ monitoring, Industrial IoT และระบบควบคุมแบบเวลาจริง

ในระบบชาร์จแบตเตอรี่หลายระดับแรงดัน การติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ไม่ได้มีบทบาทเพียงการแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของแบตเตอรี่ระหว่างกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV เช่น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในช่วงกระแสคงที่ การลดลงของกระแสในช่วงแรงดันคงที่ และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตของระบบ นอกจากนี้ ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บอย่างต่อเนื่องยังสามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ วิเคราะห์แนวโน้มของพฤติกรรมแบตเตอรี่ และตรวจสอบความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการชาร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ระบบจัดเก็บข้อมูลและระบบติดตามผลแบบเรียลไทม์จึงมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความน่าเชื่อถือและความต่อเนื่องในการทำงานของระบบชาร์จแบตเตอรี่สมัยใหม่

2.6.1 การจัดเก็บข้อมูลแบบ Time-Series Database

ฐานข้อมูลแบบ Time-series ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น ค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระบบชาร์จแบตเตอรี่ โดยข้อมูลแต่ละชุดจะถูกจัดเก็บร่วมกับ Timestamp ทำให้สามารถติดตามลำดับเหตุการณ์ วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบย้อนหลัง และประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างแม่นยำ

โดย Naqvi, 2017 ได้รายงานว่าฐานข้อมูลแบบ Time-series มีข้อได้เปรียบด้าน Throughput และ Latency สำหรับงานที่ต้องรองรับข้อมูลแบบ Streaming data และ Real-time monitoring เนื่องจากสามารถจัดเก็บข้อมูลจำนวนมากได้อย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งรองรับการ Query ข้อมูลตามช่วงเวลาและการคำนวณเชิงสถิติแบบเวลาจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ฐานข้อมูลประเภทนี้เหมาะสมต่อระบบชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งต้องมีการจัดเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดและระบบควบคุมอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการชาร์จ
ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บในระบบ Time-series สามารถอธิบายได้ในรูปแบบเวกเตอร์เชิงเวลาดังสมการที่ (2.10)

$$\text{Data}(t) = \{V(t), I(t), P(t), T(t), SOC(t)\} \tag{2.10}$$

ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแบตเตอรี่ระหว่างช่วง CC และ CV รวมถึงใช้ประเมินความเสถียรของระบบชาร์จในแต่ละระดับแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.6.2 การแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard แบบเรียลไทม์

การแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard visualization มีบทบาทสำคัญต่อการติดตามสถานะของระบบชาร์จแบตเตอรี่ เนื่องจากช่วยให้สามารถตรวจสอบข้อมูลทางไฟฟ้าและสถานะของระบบได้อย่างต่อเนื่องในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่าย ทั้งในรูปแบบกราฟ สถานะเชิงตัวเลข และแนวโน้มของข้อมูลตามช่วงเวลา โดย Wilkinson, 2005 ได้รายงานว่าการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบ Graphical visualization ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลา ลดความซับซ้อนของข้อมูลจำนวนมาก และช่วยให้สามารถตรวจพบความผิดปกติของระบบได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในระบบชาร์จแบตเตอรี่ ข้อมูลที่นิยมแสดงผลแบบเรียลไทม์ ได้แก่ ค่าแรงดันกระแส กำลังไฟฟ้า พลังงานสะสม อุณหภูมิ และสถานะของกระบวนการชาร์จ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงของการชาร์จแบบ CC-CV ดังนั้น Dashboard visualization จึงไม่เพียงทำหน้าที่แสดงข้อมูลเท่านั้น แต่ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มของพฤติกรรมแบตเตอรี่และประเมินสมรรถนะของระบบได้แบบเวลาจริง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลแบบเวลาจริงสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.11)

$$x(t) = x_0 + \Delta x(t) \tag{2.11}$$

สมการดังกล่าวใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่องในระบบ Monitoring และ Supervisory control

2.6.3 การติดตามข้อมูลด้านอินพุตของระบบชาร์จ

ข้อมูลด้านอินพุตของระบบชาร์จประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานสะสม และตัวประกอบกำลัง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบและการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในกระบวนการชาร์จ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.12)

$$P_{AC} = V_{AC} I_{AC} PF \tag{2.12}$$

ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบชาร์จ รวมถึงประเมินต้นทุนด้านพลังงานในแต่ละช่วงเวลาการทำงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6.4 การติดตามข้อมูลด้านเอาต์พุตของระบบชาร์จ

ข้อมูลด้านเอาต์พุตของระบบชาร์จเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของแบตเตอรี่ระหว่างกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV โดยเฉพาะค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และสถานะประจุ ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของแบตเตอรี่และประเมินเสถียรภาพของระบบชาร์จในแต่ละช่วงเวลากำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.13)

$$P_{DC}=V_{DC}I_{DC} \tag{2.13}$$

ในช่วง CC ค่ากระแสจะมีค่าคงที่ ขณะที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นตามสถานะของแบตเตอรี่ ส่วนในช่วง CV ค่าแรงดันจะถูกควบคุมให้คงที่และค่ากระแสจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่เงื่อนไขสิ้นสุดการชาร์จ พฤติกรรมดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการชาร์จและใช้ประกอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน

2.7 การคำนวณพลังงานและต้นทุนการชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ

ในระบบชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน การประเมินพลังงานไฟฟ้าและต้นทุนด้านพลังงานถือเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการวิเคราะห์สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากกระบวนการชาร์จเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนพลังงานจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรแปลงกำลัง ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแส จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงของการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ดังนั้น การติดตามข้อมูลด้านพลังงานจึงมีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบ วิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน และประเมินต้นทุนด้านพลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการชาร์จ

นอกจากนี้ ในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ การคิดค่าไฟฟ้ามักใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ Time of Use (TOU) ซึ่งกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าแตกต่างกันตามช่วงเวลาการใช้งาน ส่งผลให้ต้นทุนของกระบวนการชาร์จไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เกิดการใช้พลังงานอีกด้วย ดังนั้น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโปรไฟล์การชาร์จ พฤติกรรมการใช้พลังงาน และอัตราค่าไฟฟ้า จึงมีบทบาทสำคัญต่อการประเมินต้นทุนของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ

2.7.1 โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ประเภทที่ 1

อัตราค่าไฟฟ้าแบบ Time of Use หรือ TOU เป็นโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าที่กำหนดราคาพลังงานไฟฟ้าแตกต่างกันตามช่วงเวลาการใช้งาน เพื่อกระจายภาระโหลดของระบบไฟฟ้าและลดการใช้พลังงานในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง โดยอัตราค่าไฟฟ้าจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง On-Peak และ Off-Peak ซึ่งมีอัตราค่าไฟฟ้าแตกต่างกันตามช่วงเวลาของวัน

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ประเภทที่ 1 (มิเตอร์ 1.3) ซึ่งกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำ โดยในช่วง On-Peak จะมีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่าช่วง Off-Peak เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้พลังงานสูงในระบบไฟฟ้า ดังนั้น ช่วงเวลาของกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่จึงส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนพลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการชาร์จ

แรงดัน	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	On Peak	Off Peak	
1.3.1 12 – 24 กิโลโวลต์	5.1135	2.6037	312.24
1.3.2 ต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	5.7982	2.6369	24.62

On Peak : เวลา 09.00 - 22.00 น. วันจันทร์ - วันศุกร์

Off Peak : เวลา 22.00 - 09.00 น. วันจันทร์ - วันศุกร์

: เวลา 00.00 - 24.00 น. วันเสาร์ - วันอาทิตย์ วันแรงงานแห่งชาติ

วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันพืชมงคลและวันหยุดชดเชย)

รูปที่ 2.3 อัตราค่าไฟฟ้าแบบ Time of Use (TOU) ประเภทที่ 1.3

2.7.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตของระบบชาร์จ

กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตของระบบชาร์จเป็นค่าที่แสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ถูกดึงจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่เครื่องชาร์จในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.12) ในหัวข้อ 2.6.3 โดยค่ากำลังไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามพฤติกรรมของระบบชาร์จและสถานะของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะในช่วงเปลี่ยนผ่านระหว่าง CC และ CV ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานสะสมและต้นทุนด้านพลังงานของระบบ

2.7.3 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าสะสม

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการชาร์จสามารถคำนวณได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าตามช่วงเวลา โดยในระบบที่มีการติดตามข้อมูลแบบเวลาจริง พลังงานไฟฟ้าสะสมสามารถคำนวณได้จากสมการเชิงอินทิกรัลพลังงานไฟฟ้าสะสมสามารถคำนวณได้จากสมการเชิงอินทิกรัลหาได้ดังสมการที่ (2.14)

$$E=\int_{t_0}^{t_n} P(t)dt \qquad (2.14)$$

ในระบบดิจิทัลที่มีการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง พลังงานไฟฟ้าสามารถคำนวณในรูปแบบ Discrete และการคำนวณประสิทธิภาพได้ดังสมการที่ (2.15)

$$E=\sum_{i=1}^{n} P_i \Delta t \quad \text{และ} \quad \eta = \frac{P_{DC}}{P_{AC}} \times 100 \tag{2.15}$$

สมการดังกล่าวถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบ Energy monitoring และระบบวิเคราะห์พลังงานแบบเวลาจริง เนื่องจากสามารถคำนวณพลังงานจากข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่อง

2.7.4 การคำนวณต้นทุนพลังงานแบบ TOU

ต้นทุนพลังงานของระบบชาร์จแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับทั้งปริมาณพลังงานที่ใช้และช่วงเวลาที่ทำการชาร์จ เนื่องจากอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU กำหนดอัตราค่าไฟฟ้าแตกต่างกันระหว่างช่วง On-Peak และ Off-Peak ดังนั้น การคำนวณต้นทุนพลังงานจำเป็นต้องพิจารณาพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาแยกจากกันต้นทุนพลังงานสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.16)

$$\text{Cost} = (E_{on} \times \text{Rate}_{on}) + (E_{off} \times \text{Rate}_{off}) + \text{ServiceCharge} \tag{2.16}$$

สมการดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินต้นทุนของกระบวนการชาร์จในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างชัดเจน และสามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบของช่วงเวลาการชาร์จที่มีต่อต้นทุนพลังงานของระบบได้

2.7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโปรไฟล์การชาร์จกับต้นทุนพลังงาน

แม้ว่ากระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV จะถูกออกแบบเพื่อรักษาสมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความปลอดภัยของแบตเตอรี่ แต่พฤติกรรมของโปรไฟล์การชาร์จยังส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการใช้พลังงานและต้นทุนด้านพลังงานของระบบอีกด้วย โดยเฉพาะระยะเวลาของช่วง CC และ CV ซึ่งมีผลต่อปริมาณพลังงานที่ใช้และช่วงเวลาที่เกิดการใช้พลังงานสูงสุด

ในระบบแบตเตอรี่หลายระดับแรงดัน ความแตกต่างของค่ากระแสชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ และระยะเวลาการชาร์จ ส่งผลให้ลักษณะการใช้พลังงานแตกต่างกันในแต่ละระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโปรไฟล์การชาร์จและต้นทุนพลังงานจึงมีความสำคัญต่อการประเมินสมรรถนะของระบบ และสามารถใช้ประกอบการพิจารณาเลือกเงื่อนไขการชาร์จที่เหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพพลังงานและต้นทุนการใช้งาน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

<u>กลุ่มเทคนิคการชาร์จแบตเตอรี่ (Charging Methods)</u>

บทความที่ 1: Lithium-ion battery fast charging: A review

DOI: https://doi.org/10.1016/j.etran.2019.100011

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Anna Tomaszewska และคณะ จากสถาบันวิจัยด้านพลังงานระดับนานาชาติ เช่น Imperial College London และมหาวิทยาลัย Tsinghua โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาและข้อจำกัดของการชาร์จแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแบบรวดเร็ว (Fast charging) ในยานยนต์ไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมและวิเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการชาร์จในรูปแบบต่าง ๆ

ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลกระทบของการชาร์จที่อัตรากระแสสูง (High C-rate) ต่อพฤติกรรมของแบตเตอรี่ โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญ เช่น การสะสมของลิเธียมบนขั้วไฟฟ้า (Lithium plating) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และการเสื่อมสภาพของเซลล์แบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีการจำแนกวิธีการชาร์จออกเป็นหลายรูปแบบ ได้แก่ CC-CV, Multistage charging, Pulse charging และ Model-based charging พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธี

ผลการศึกษาพบว่า แม้การชาร์จแบบรวดเร็วจะสามารถลดระยะเวลาในการชาร์จได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่จะส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยเฉพาะจากปัญหา Lithium plating และความร้อนสะสม ขณะที่วิธี CC-CV ยังคงเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความเรียบง่ายและมีความปลอดภัยในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถตอบสนองต่อการชาร์จแบบรวดเร็วได้อย่างเหมาะสม จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบควบคุมที่สามารถปรับพารามิเตอร์ได้ตามสภาวะจริงของแบตเตอรี่

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้สนับสนุนแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับข้อจำกัดของการชาร์จแบบ CC-CV ซึ่งถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะในประเด็นความไม่ยืดหยุ่นต่อสภาวะการใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงพัฒนาต่อยอดโดยออกแบบระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen และควบคุมค่ากระแสและแรงดันในระดับ execution layer ผ่าน Modbus RTU แบบเชิงกำหนด (deterministic) เพื่อให้สามารถควบคุมการชาร์จได้แม่นยำและเหมาะสมกับสภาพของแบตเตอรี่มากยิ่งขึ้น

บทความที่ 2: A Review of Equivalent Circuit Model Based Online State of Power Estimation for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles

DOI: https://doi.org/10.3390/vehicles4010001

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Guo, R. และคณะ ซึ่งเป็นนักวิจัยด้านระบบแบตเตอรี่และยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาพรวมของเทคนิคการชาร์จแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน รวมถึงการวิเคราะห์ข้อดี ข้อจำกัด และความเหมาะสมของแต่ละวิธีในการประยุกต์ใช้งานกับยานยนต์ไฟฟ้า

ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมและวิเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลวิชาการ เพื่อนำมาเปรียบเทียบเทคนิคการชาร์จหลัก ได้แก่

1) การชาร์จแบบกระแสคงที่–แรงดันคงที่ (CC-CV)
2) การชาร์จแบบหลายขั้น (Multi-stage charging)
3) การชาร์จแบบพัลส์ (Pulse charging)
4) การชาร์จแบบปรับตัว (Adaptive charging)

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์พฤติกรรมของแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขการชาร์จที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญ เช่น แรงดัน กระแส อุณหภูมิ และสถานะประจุ (SOC) รวมถึงผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Cycle life) และความปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละเทคนิคในด้านเวลาในการชาร์จและการสูญเสียพลังงาน

ผลการวิจัยพบว่า วิธีการชาร์จแบบกระแสคงที่–แรงดันคงที่ (CC-CV) ยังคงเป็นวิธีมาตรฐานที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีโครงสร้างเรียบง่าย มีความเสถียร และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในระดับอุตสาหกรรม ขณะที่วิธีการชาร์จขั้นสูง เช่น adaptive charging สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความเหมาะสมของการชาร์จได้มากขึ้น แต่มีความซับซ้อนของระบบควบคุมสูง นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิและสถานะประจุ (SOC) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้นการเลือกวิธีการชาร์จที่เหมาะสมจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้านการเลือกใช้เทคนิคการชาร์จแบตเตอรี่ โดยเฉพาะการใช้วิธี CC-CV ซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบที่พัฒนา อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาพบว่าวิธี CC-CV มีข้อจำกัดในด้านความยืดหยุ่นและไม่สามารถปรับตัวตามสภาพแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพัฒนาต่อยอดโดยใช้แนวคิด “**การเลือกโปรไฟล์การชาร์จ**” ผ่านการสื่อสาร CANopen และควบคุมค่ากระแสและแรงดันในระดับ Execution layer ผ่าน Modbus RTU แบบเชิงฮาร์ดแวร์ ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถกำหนดพฤติกรรมการชาร์จได้อย่างแม่นยำ เสถียร และสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

<u>การประยุกต์ใช้ CANopen ในระบบ Battery Management System (BMS)</u>

บทความที่ 3: Development of an EV Battery Management Display with CANopen Communication DOI: https://doi.org/10.3390/wevj16070375

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Yanpreechaset, C. มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและออกแบบระบบแสดงผลข้อมูลของระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้การสื่อสารผ่านโปรโตคอล CANopen เพื่อให้สามารถติดตามสถานะของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบที่สามารถรับข้อมูลจาก BMS เช่น ค่าแรงดัน กระแส และสถานะของแบตเตอรี่ ผ่านเครือข่าย CANopen และนำข้อมูลดังกล่าวไปประมวลผลเพื่อแสดงผลบนอินเทอร์เฟซผู้ใช้งาน (Display system) โดยเน้นการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่ายและรองรับการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาโครงสร้างระบบที่สามารถเชื่อมโยงระหว่างระบบสื่อสารและระบบแสดงผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง โดยประเมินความถูกต้องของข้อมูล ความหน่วงของระบบ และความสามารถในการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถนำไปใช้งานร่วมกับยานยนต์ไฟฟ้าได้จริง

ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรับและแสดงผลข้อมูลจาก BMS ผ่าน CANopen ได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง โดยมีความหน่วงต่ำและสามารถแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสะดวกในการติดตามสถานะแบตเตอรี่และปรับปรุงประสบการณ์การใช้งานของระบบยานยนต์ไฟฟ้า

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้านการใช้โปรโตคอล CANopen ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะการรับ–ส่งข้อมูลจากแบตเตอรี่และระบบ BMS อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้พัฒนาต่อยอดจากแนวคิดดังกล่าว โดยไม่ได้ใช้ CANopen เพียงเพื่อการแสดงผลข้อมูล แต่ใช้เป็นกลไกหลักในการ “กำหนดและเลือกโปรไฟล์การชาร์จ” และเชื่อมโยงไปยังการควบคุมในระดับ execution layer ผ่าน Modbus RTU ซึ่งช่วยให้ระบบมีความสามารถในการควบคุมเชิงกำหนด (Deterministic control) และมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บทความที่ 4: Development of an Improved Communication Control System for ATV Electric Vehicles Using MRS Developers Studio

DOI: https://doi.org/10.3390/wevj15070303

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Donjaroennon, N. ซึ่งเป็นผู้วิจัยเดียวกันกับงานวิจัยฉบับนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบที่เกี่ยวข้องกับการจัดการแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารผ่านโปรโตคอล CAN หรือ CANopen เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในระบบ เช่น แบตเตอรี่ หน่วยควบคุม และอุปกรณ์แสดงผล ในเชิงวิธีการผู้วิจัยได้ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบที่สามารถรับข้อมูลจากแบตเตอรี่ เช่น ค่าแรงดัน กระแส และสถานะการทำงาน ผ่านเครือข่าย CAN โดยใช้ CANopen เป็นโปรโตคอลหลักในการจัดการข้อมูล (object dictionary, CAN ID) และกำหนดรูปแบบการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในระบบ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาอินเทอร์เฟซสำหรับแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะของระบบแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่อง

ในกระบวนการพัฒนา ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง โดยประเมินความถูกต้องของข้อมูลที่รับ–ส่งผ่านเครือข่าย CANopen ความเสถียรของระบบสื่อสาร และความสามารถในการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ รวมถึงตรวจสอบความหน่วงของระบบ (latency) และความสอดคล้องของข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทาง

ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรับ–ส่งข้อมูลผ่าน CANopen ได้อย่างถูกต้องและมีความเสถียร โดยข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดจริง และสามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังพบว่าระบบมีความหน่วงต่ำเพียงพอสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงทำหน้าที่ในลักษณะของ “การสื่อสารและแสดงผลข้อมูล” เป็นหลัก และยังไม่ได้มีการนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบในระดับปฏิบัติการ (execution layer)

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

งานวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัยเป็นพื้นฐานสำคัญของงานวิจัยฉบับนี้ โดยเฉพาะในด้านการพัฒนาโครงสร้างการสื่อสารผ่าน CANopen และการจัดการข้อมูลจากระบบแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้ายังมีข้อจำกัดในด้านการนำข้อมูลไปใช้เพื่อควบคุมพฤติกรรมของระบบจริง ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงพัฒนาต่อยอดจากงานก่อนหน้า โดยนำ CANopen มาใช้เป็นกลไกในการ “กำหนดและเลือกโปรไฟล์การชาร์จ” และเชื่อมโยงไปยังการควบคุมในระดับ execution layer ผ่าน Modbus RTU โดยใช้แนวทางการควบคุมเชิงฮาร์ดแวร์ (hardware-enforced control) ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมค่ากระแสและแรงดันได้อย่างแม่นยำ เป็นเชิงกำหนด (deterministic) และเหมาะสมกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

<u>กลุ่มที่ 3: การสื่อสาร Modbus RTU สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ระดับฟิลด์</u>

บทความที่ 4: Design and Implementation of an Error Detection and Correction Method Compatible with MODBUS-RTU by Means of Systematic Codes

DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.055

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Claudio Urrea โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงความน่าเชื่อถือของการสื่อสารในโปรโตคอล Modbus RTU ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบควบคุมระดับภาคสนาม (Field level) โดยเฉพาะในระบบอัตโนมัติและโรงงานอุตสาหกรรม ในเชิงปัญหา ผู้วิจัยชี้ให้เห็นว่า Modbus RTU แม้จะเป็นโปรโตคอลที่เรียบง่ายและได้รับความนิยมสูง แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือ ไม่มีความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูล (Error correction) โดยใช้เพียง CRC ในการตรวจจับข้อผิดพลาดเท่านั้น เมื่อเกิดความผิดพลาด ข้อมูลจะถูกทิ้งและต้องทำการส่งใหม่ ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าและลดประสิทธิภาพของระบบ

ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้เสนอการเพิ่มกลไก Error detection และ Error correction โดยใช้เทคนิค Reed–Solomon coding ซึ่งเป็นรูปแบบของ Forward error correction (FEC) เข้าไปในระบบ Modbus RTU โดยยังคงรักษาโครงสร้างของโปรโตคอลเดิมไว้ เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์มาตรฐานได้ โครงสร้างที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย

1) การเพิ่ม parity bits ลงในเฟรมข้อมูล
2) การใช้ repeater/error corrector device ทำหน้าที่เข้ารหัสและถอดรหัส
3) การใช้ช่วงเวลาว่างของบัส (Time window) เพื่อแทรกข้อมูลสำหรับการแก้ไขข้อผิดพลาด
4) การออกแบบระบบบนไมโครคอนโทรลเลอร์ (เช่น dsPIC) เพื่อใช้งานจริงในระดับฮาร์ดแวร์

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้สร้างเครือข่ายการสื่อสาร Modbus RTU จำลองที่มีสัญญาณรบกวนสูง (Electromagnetic interference) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ โดยกำหนดอัตราความผิดพลาดของข้อมูลสูงถึงประมาณ 60% ของเฟรมข้อมูล เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วยลดการสูญหายของข้อมูลและลดความจำเป็นในการส่งข้อมูลซ้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการสื่อสารในเครือข่าย Modbus RTU ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แม้ในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ Modbus RTU เดิมได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของระบบ

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องอย่างยิ่งกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้านการใช้ Modbus RTU สำหรับควบคุมอุปกรณ์ในระดับ Execution layer โดยเฉพาะในประเด็น “**ความน่าเชื่อถือของการสื่อสาร**” ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความถูกต้องของการควบคุม

ในงานวิจัยนี้ Modbus RTU ถูกใช้ในการกำหนดค่ากระแสและแรงดันของเครื่องชาร์จผ่านอุปกรณ์ภาคสนาม ดังนั้น หากเกิดข้อผิดพลาดในการสื่อสาร จะส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของระบบชาร์จ บทความนี้จึงสนับสนุนแนวคิดว่าการเพิ่มความสามารถในการตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดจะช่วยให้ระบบควบคุมเชิงฮาร์ดแวร์มีความแม่นยำ เสถียร และเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการควบคุมแบบ Deterministic ในระดับ Execution layer

---

บทความที่ 4: Proposed Modbus Extension Protocol and Real-Time Communication Timing Requirements for Distributed Embedded Systems

DOI: https://doi.org/10.3390/technologies12100187

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดยกลุ่มนักวิจัยด้านระบบสื่อสารอุตสาหกรรมและระบบฝังตัว (Embedded systems) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงโปรโตคอล Modbus RTU ให้สามารถรองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ (Real-time communication) และมีพฤติกรรมเชิงกำหนด (Deterministic behavior) ซึ่งเป็นข้อกำหนดสำคัญในระบบควบคุมระดับภาคสนามและระบบอุตสาหกรรม ในเชิงปัญหา ผู้วิจัยชี้ให้เห็นว่า Modbus RTU แบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดในด้าน “เวลาในการตอบสนอง” และ “ความไม่แน่นอนของรอบการสื่อสาร (Acquisition cycle)” เนื่องจากโครงสร้างการสื่อสารแบบ Client–server และการ Polling ทำให้ไม่สามารถควบคุมเวลาได้อย่างแม่นยำในระบบที่ต้องการ real-time control ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้เสนอการพัฒนาโปรโตคอลใหม่ที่เรียกว่า ModbusE (Modbus Extension) ซึ่งเป็นการขยายความสามารถของ Modbus RTU โดยมีแนวคิดสำคัญ ได้แก่

1) การกำหนด acquisition cycle แบบคาบเวลา (Periodic cycle)
2) การเพิ่ม timestamp ลงในข้อมูลเพื่อให้เกิด Time consistency
3) การออกแบบโครงสร้าง Message ใหม่เพื่อให้สามารถรวมข้อมูลจากหลาย register ได้
4) การปรับปรุงกลไกการสื่อสารให้มีลักษณะ Deterministic มากขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์เชิงเวลา (Timing analysis) ของ Modbus RTU เช่น

1) การกำหนดช่วงเวลาว่างระหว่างเฟรม (เช่น t3.5)
2) โครงสร้าง Frame ขนาดสูงสุด 256 bytes
3) การทำงานของ CRC สำหรับตรวจจับข้อผิดพลาด
4) ความสัมพันธ์ระหว่าง Baud rate กับ Cycle time

ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบต้นแบบ (Prototype system) และทำการทดลองในเครือข่ายจริง โดยเปรียบเทียบระหว่าง Modbus RTU แบบดั้งเดิมกับ ModbusE ทั้งในด้านเวลาการสื่อสารและความสม่ำเสมอของข้อมูล

ผลการวิจัยพบว่า ModbusE สามารถปรับปรุงพฤติกรรมของระบบสื่อสารให้มีความเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) มากขึ้น โดยช่วยให้การสื่อสารเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่กำหนดอย่างชัดเจน ลดความแปรผันของเวลาในการตอบสนอง และเพิ่มความสอดคล้องของข้อมูลในระบบควบคุมแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ยังพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ Modbus RTU แบบเดิม โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำและต่อเนื่อง

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้านการใช้ Modbus RTU สำหรับควบคุมอุปกรณ์ในระดับ Execution layer โดยเฉพาะในประเด็น “การควบคุมเชิงกำหนด (Deterministic control)” ซึ่งเป็นแนวคิดหลักของงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้ Modbus RTU ถูกใช้ในการกำหนดค่ากระแสและแรงดันของเครื่องชาร์จในระดับฮาร์ดแวร์ ดังนั้นความสามารถในการควบคุมเวลาและความสม่ำเสมอของการสื่อสารจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง บทความนี้จึงสนับสนุนแนวคิดว่าการพัฒนาโครงสร้างการสื่อสารให้มีลักษณะ Deterministic จะช่วยเพิ่มความแม่นยำ ความเสถียร และความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการควบคุมในระดับ Execution layer

---

<u>กลุ่มที่ 4: การประมวลผลและแสดงผลข้อมูลด้วย Node-RED และ Grafana</u>

บทความที่ 7: IoT-based Real-Time Monitoring of Agricultural Wastewater Using Raspberry Pi, Node-RED, and Grafana

DOI: https://doi.org/10.11591/eei.v14i6.10170

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Nur’in Batrisyia Mohd Faizu โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและออกแบบระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียทางการเกษตรแบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ร่วมกับเครื่องมือ Node-RED และ Grafana เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูล

ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบที่ประกอบด้วยหลายส่วน ได้แก่

1) Raspberry Pi ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลัก
2) Sensor Module สำหรับวัดค่าต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ น้ำ และค่าการนำไฟฟ้า (EC)
3) Node-RED ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับจัดการ Flow ของข้อมูล เช่น การรับข้อมูลจากเซนเซอร์ การประมวลผล และการส่งต่อข้อมูล
4) InfluxDB ใช้เป็นฐานข้อมูลแบบ Time-series สำหรับจัดเก็บข้อมูล
5) Grafana ใช้สำหรับแสดงผลข้อมูลในรูปแบบ dashboard แบบเรียลไทม์

ข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกส่งเข้าสู่ Node-RED เพื่อทำการประมวลผล เช่น การกรองข้อมูล การแปลงหน่วย และการจัดรูปแบบ ก่อนจะถูกบันทึกลงใน InfluxDB และนำไปแสดงผลผ่าน Grafana โดยผู้ใช้งานสามารถดูข้อมูลย้อนหลังและวิเคราะห์แนวโน้มได้ ในการทดลอง ผู้วิจัยได้ทดสอบระบบกับตัวอย่างน้ำหลายประเภท เช่น น้ำดื่ม น้ำเกษตร และน้ำที่มีสารปนเปื้อน เพื่อประเมินความแม่นยำของระบบและความสามารถในการทำงานแบบเรียลไทม์

ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลได้แบบเรียลไทม์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความแม่นยำของค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 85% และสามารถทำงานได้อย่างเสถียรในสภาพแวดล้อมจริง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ Node-RED ช่วยลดความซับซ้อนในการพัฒนา ขณะที่ Grafana ช่วยให้การแสดงผลข้อมูลมีความชัดเจนและเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลระยะยาว

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้านการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล โดยเฉพาะการใช้ Node-RED และ Grafana ในการจัดการข้อมูลแบบเรียลไทม์

ในงานวิจัยนี้ Node-RED ถูกใช้ในการจัดการข้อมูลจากระบบชาร์จ เช่น การรับ–ส่งข้อมูล และการจัดการ Flow ของข้อมูล ขณะที่ Grafana ถูกใช้ในการแสดงผลค่ากระแส แรงดัน และพฤติกรรมการชาร์จแบบเรียลไทม์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางในบทความนี้ที่ใช้ Node-RED และ Grafana ร่วมกันเพื่อสร้างระบบ monitoring ที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูง

บทความที่ 8: Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions

DOI: https://doi.org/10.3390/iot1010005

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย I.-V. Năstac โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) โดยใช้ Node-RED และ Grafana เป็นเครื่องมือหลักในการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล ในเชิงแนวคิด ผู้วิจัยได้เสนอการพัฒนา SCADA แบบใหม่ที่มีลักษณะเป็น

1) Low cost
2) Modular system
3) Web-based platform
4) รองรับแนวคิด Industry 4.0 และ IoT

ในเชิงวิธีการ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่

1) Node-RED ทำหน้าที่เป็น Middleware สำหรับ

รับข้อมูลจาก PLC / Sensors ประมวลผลข้อมูล
จัดการ flow ของระบบ

2) InfluxDB ใช้เป็นฐานข้อมูลแบบ time-series
3) Grafana ใช้แสดงผลข้อมูลในรูปแบบ dashboard
4) Protocol ที่ใช้ Modbus TCP และ MQTT

ระบบสามารถเชื่อมต่อกับ PLC และอุปกรณ์ภาคสนาม เพื่อดึงข้อมูล เช่น ค่ากระแส แรงดัน และสถานะการทำงาน จากนั้น Node-RED จะประมวลผลและส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูล และแสดงผลผ่าน Grafana ในรูปแบบ SCADA dashboard

ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถรับ–ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ข้อมูลสามารถแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ผ่าน Grafana และมีความหน่วงต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ Node-RED ช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับแต่งและขยายระบบได้ง่าย อีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับ SCADA แบบดั้งเดิม

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้านการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล โดยเฉพาะการใช้ Node-RED และ Grafana ในลักษณะของระบบควบคุมและ Monitoring

ในงานวิจัยนี้ Node-RED ถูกใช้เป็น control layer สำหรับจัดการข้อมูลจากระบบชาร์จ เช่น การรับข้อมูลจาก CANopen และ Modbus RTU รวมถึงการจัดการ flow ของข้อมูล ขณะที่ Grafana ถูกใช้ในการแสดงผลค่ากระแส แรงดัน และพฤติกรรมการชาร์จแบบเรียลไทม์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางในบทความนี้ที่ใช้ Node-RED เป็น Middleware และ Grafana เป็น Visualization layer ในระบบ SCADA

บทความที่ 9: Security by Design for Industrial Control Systems from a Cyber–Physical System Perspective: A Systematic Mapping Study
DOI: https://doi.org/10.3390/machines13070538

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Ahmed Elmarkez โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการ Security-by-Design สำหรับระบบควบคุมอุตสาหกรรม (Industrial Control Systems: ICS) โดยใช้วิธีการ Systematic mapping study เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มและช่องว่างของงานวิจัยที่มีอยู่ ในเชิงปัญหาผู้วิจัยระบุว่า ระบบ ICS ในปัจจุบันมีการเชื่อมต่อกับเทคโนโลยี IT และเครือข่ายมากขึ้น ทำให้เกิดช่องโหว่ด้านความปลอดภัย เนื่องจากระบบเดิมไม่ได้ถูกออกแบบมาให้รองรับภัยคุกคามทางไซเบอร์

ส่งผลให้ระบบมีความเสี่ยงทั้งด้าน security และ safety ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมงานวิจัยจำนวน 55 งานวิจัยหลัก และทำการวิเคราะห์ในประเด็นสำคัญ ได้แก่

1) วิธีการออกแบบระบบแบบ Security-by-Design
2) ขั้นตอนใน lifecycle เช่น requirement, design, implementation
3) การวิเคราะห์ภัยคุกคาม (threat analysis) และ vulnerability
4) การกำหนด security objectives เช่น confidentiality, integrity, availability (CIA)
5) การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง security กับ safety และ performance

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์เชิงสถาปัตยกรรมของระบบ CPS ซึ่งแบ่งออกเป็น

1) Physical layer (sensor / actuator)
2) Cyber layer (processing / communication)
3) Control layer

และเน้นว่าความปลอดภัยต้องถูกออกแบบ “ตั้งแต่ต้นระบบ” ไม่ใช่เพิ่มภายหลัง

ผลการวิจัยพบว่า แนวทาง Security-by-Design มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาระบบควบคุมอุตสาหกรรม โดยสามารถช่วยลดความเสี่ยงจากช่องโหว่และเพิ่มความปลอดภัยของระบบได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังเน้นเฉพาะขั้นตอนการออกแบบ (design phase) และยังขาดการบูรณาการความปลอดภัยในทุกช่วงของ lifecycle รวมถึงยังมีปัญหาในการจัดการความขัดแย้งระหว่าง security, safety และ performance ซึ่งจำเป็นต้องมีการพัฒนาแนวทางที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้าน การออกแบบระบบแบบ Safety-by-Design และ Deterministic Control โดยเฉพาะในประเด็นการพิจารณาความปลอดภัยตั้งแต่ระดับสถาปัตยกรรมของระบบ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบที่ใช้ CANopen และ Modbus RTU ในระดับ Execution layer โดยมุ่งเน้นให้ระบบมีพฤติกรรมเชิงกำหนด (Deterministic) และมีความปลอดภัยในการควบคุมค่ากระแสและแรงดัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดในบทความนี้ที่เน้นการบูรณาการ Security และ Safety ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบระบบ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและลดความเสี่ยงของระบบในงานจริง

บทความที่ 10: Recent Developments and Challenges on Beam Steering Characteristics of Reconfigurable Transmitarray Antennas

DOI: https://doi.org/10.3390/electronics11040587

เนื้อหาบทความ:

บทความนี้จัดทำโดย Ali, Q. และคณะ ซึ่งเป็นนักวิจัยด้านวิศวกรรมสื่อสารและเทคโนโลยีเสาอากาศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาและความท้าทายของเทคโนโลยี Transmitarray Antennas แบบปรับเปลี่ยนได้ (Reconfigurable Transmitarray Antennas) โดยเฉพาะในด้าน Beam Steering ซึ่งเป็นเทคนิคสำคัญในการควบคุมทิศทางของสัญญาณ

ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนและวิเคราะห์เทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมทิศทางของลำสัญญาณ เช่น การปรับเฟสขององค์ประกอบเสาอากาศ การใช้โครงสร้างแบบ Reconfigurable และการใช้วัสดุหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น PIN diode หรือ Varactor เพื่อควบคุมพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธีในด้านประสิทธิภาพ ความซับซ้อน และต้นทุน

ผู้วิจัยยังได้วิเคราะห์ปัญหาที่สำคัญ เช่น ความสูญเสียของสัญญาณ (Insertion loss) ความแม่นยำในการควบคุมเฟส และความซับซ้อนของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระบบสื่อสารไร้สายความถี่สูงและระบบเรดาร์

ผลการวิจัยพบว่า เทคโนโลยี Transmitarray antenna แบบปรับเปลี่ยนได้มีศักยภาพสูงในการควบคุมทิศทางของสัญญาณอย่างยืดหยุ่น และสามารถนำไปใช้ในระบบสื่อสารสมัยใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดในด้านความซับซ้อนของการออกแบบและความสูญเสียของสัญญาณ ซึ่งต้องได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในเชิงอุตสาหกรรม

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

แม้ว่าบทความนี้จะอยู่ในสาขาวิศวกรรมสื่อสาร แต่มีความเกี่ยวข้องในเชิงแนวคิดด้าน การควบคุมพฤติกรรมของระบบแบบเชิงกำหนด (Controlled behavior) และการออกแบบระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการควบคุมค่ากระแสและแรงดันของระบบชาร์จในระดับ Execution layer ให้มีความแม่นยำและเสถียร

2.9 การวิเคราะห์ช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap Analysis)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า งานวิจัยด้านระบบชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการพัฒนากลยุทธ์การชาร์จแบบ CC-CV การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการชาร์จ และการลดการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ โดยมุ่งเน้นการควบคุมแรงดัน กระแส และอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในระหว่างกระบวนการชาร์จ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวนมากยังคงพิจารณาแบตเตอรี่เพียงระบบเดียว หรือใช้ค่าพารามิเตอร์การชาร์จแบบกำหนดค่าคงที่ ซึ่งยังไม่สามารถรองรับระบบแบตเตอรี่หลายระดับแรงดันที่ต้องใช้เงื่อนไขการชาร์จแตกต่างกันได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่ยังอาศัยการกำหนดค่าพารามิเตอร์โดยผู้ปฏิบัติงาน ส่งผลให้

เกิดความเสี่ยงต่อความผิดพลาดในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ และอาจส่งผลต่อสมรรถนะหรืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในระยะยาว

ในด้านระบบสื่อสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CAN และ CANopen ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการรับส่งข้อมูลระหว่างระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่และอุปกรณ์ควบคุมภายในระบบยานยนต์ไฟฟ้าหรือระบบอุตสาหกรรม โดยให้ความสำคัญกับความต่อเนื่องในการสื่อสาร การลดความหน่วงของระบบ และการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่ยังใช้ CANopen ในลักษณะของ Communication protocol สำหรับการติดตามสถานะของแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว และยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่นำ CAN Identifier มาใช้สำหรับการระบุพารามิเตอร์เฉพาะของแบตเตอรี่เพื่อสนับสนุนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ

นอกจากนี้ แม้ว่าระบบ supervisory control และ Industrial IoT จะได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลายในงานด้านพลังงานและระบบอัตโนมัติ แต่การบูรณาการ MQTT, Modbus RTU และแพลตฟอร์ม Supervisory control สำหรับระบบชาร์จแบตเตอรี่หลายระดับแรงดันยังมีข้อจำกัดอยู่มาก โดยเฉพาะการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่าง Field layer, communication layer และ Data analytics layer ให้สามารถทำงานร่วมกันแบบเวลาจริงได้อย่างต่อเนื่อง งานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่ยังขาดการบูรณาการระบบสื่อสารหลายโปรโตคอลร่วมกับระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่สามารถตอบสนองต่อคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละประเภทได้อย่างเป็นระบบ

ในด้านการติดตามข้อมูลและการวิเคราะห์พลังงาน งานวิจัยที่ผ่านมาให้ความสำคัญกับการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์และการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ Time-series มากขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวนมากยังคงมุ่งเน้นเพียงการติดตามค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส และสถานะประจุ โดยยังขาดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการชาร์จ พลังงานไฟฟ้าด้านอินพุต และต้นทุนด้านพลังงานภายใต้โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบชาร์จในสภาวะการใช้งานจริง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการบูรณาการระบบสื่อสาร CANopen ร่วมกับ MQTT, Modbus RTU และ supervisory control platform เพื่อใช้ในการระบุพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดัน และสนับสนุนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ให้มีความถูกต้องโดยปราศจากการกำหนดค่าด้วยมนุษย์ นอกจากนี้ ยังมุ่งเน้นการจัดเก็บและติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ร่วมกับการวิเคราะห์พลังงานและต้นทุนการชาร์จภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ ความต่อเนื่อง และประสิทธิภาพของระบบชาร์จแบตเตอรี่ในสภาวะการใช้งานจริง

2.10 สรุป

บทที่ 2 ได้นำเสนอแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แรงดันต่ำ กระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ระบบสื่อสาร CAN และ CANopen รวมถึงระบบ Supervisory control ที่ใช้ MQTT, Modbus RTU และ Node-RED สำหรับการเชื่อมโยงและควบคุมข้อมูลภายในระบบชาร์จ นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอแนวทางการจัดเก็บและติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า และการคำนวณต้นทุนด้านพลังงานภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ตลอดจนวิเคราะห์ข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมาและช่องว่างขององค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งองค์ความรู้ทั้งหมดในบทนี้เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการออกแบบ พัฒนา และประเมินระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดันในบทถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

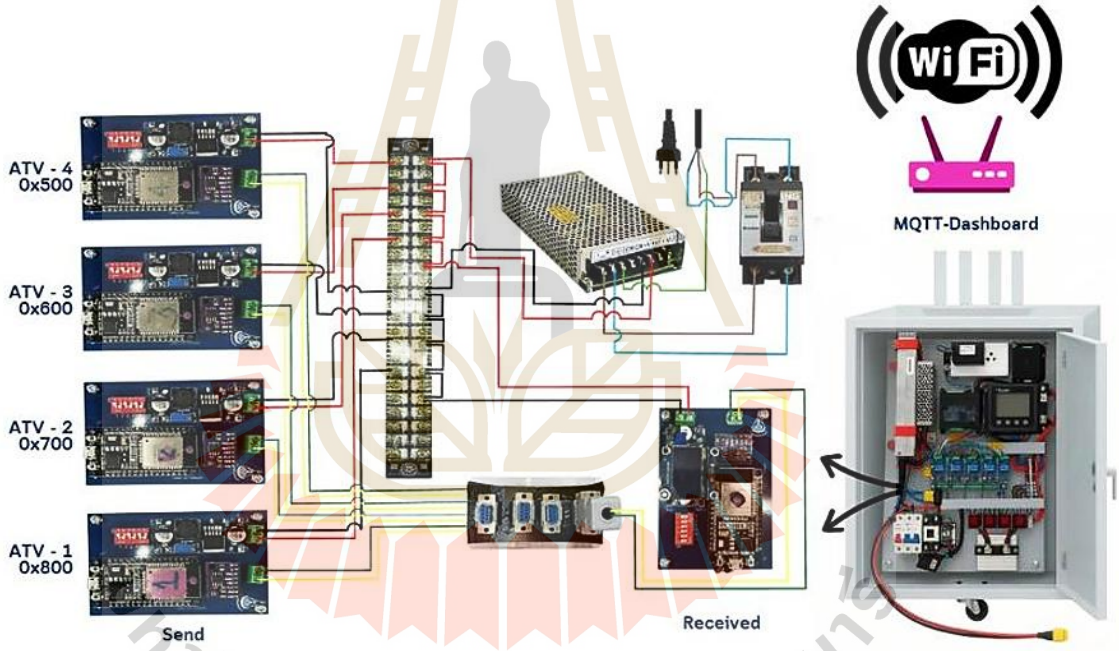
บทนี้นำเสนอวิธีดำเนินการวิจัยสำหรับการออกแบบ พัฒนา และประเมินสมรรถนะของระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แรงดันต่ำของยานยนต์ไฟฟ้า ATV โดยมุ่งเน้นการควบคุมกระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่แต่ละระบบอย่างถูกต้อง มีเสถียรภาพ และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการใช้งานจริง งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการลดความผิดพลาดจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยมนุษย์ ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อความปลอดภัย ประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จแบตเตอรี่ โดยเฉพาะในระบบที่รองรับแบตเตอรี่หลายระดับแรงดันซึ่งต้องใช้เงื่อนไขการชาร์จแตกต่างกันในแต่ละระบบ

แนวคิดหลักของงานวิจัยคือการบูรณาการระบบสื่อสาร ระบบควบคุม และระบบติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์เข้าด้วยกัน ภายใต้โครงสร้างการทำงานแบบหลายระดับ (Multi-layer architecture) เพื่อให้สามารถระบุข้อมูลประจำแบตเตอรี่ เลือกโปรไฟล์การชาร์จ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จได้อย่างเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) โดยใช้ CANopen เป็นกลไกหลักในการระบุพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ผ่าน CAN Identifier ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะถูกส่งเข้าสู่ Supervisory layer ผ่าน MQTT เพื่อให้แพลตฟอร์ม Node-RED ทำหน้าที่ประมวลผล วิเคราะห์ และเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสม ก่อนถ่ายทอดคำสั่งไปยัง Execution layer ผ่าน Modbus RTU เพื่อกำหนดค่าการทำงานของเครื่องชาร์จแบบโปรแกรมได้

ในงานวิจัยนี้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จไม่ได้อาศัยการปรับค่าผ่านซอฟต์แวร์เพียงอย่างเดียว แต่ใช้แนวทาง hardware-enforced parameter configuration ซึ่งกำหนดค่าความต้านทานและพารามิเตอร์ของระบบชาร์จไว้ล่วงหน้าในระดับฮาร์ดแวร์ เพื่อให้ค่าการชาร์จที่ถูกเลือกไม่สามารถ

เปลี่ยนแปลงได้ระหว่างกระบวนการทำงาน แนวทางดังกล่าวช่วยลดความเสี่ยงจากความผิดพลาดของระบบควบคุม เพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการชาร์จ และช่วยให้ระบบสามารถทำงานซ้ำได้อย่างมีเสถียรภาพในทุกเงื่อนไขการทดลอง

นอกจากนี้ ระบบยังได้รับการออกแบบให้รองรับการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตของระบบชาร์จ โดยข้อมูลด้านอินพุตกระแสสลับ เช่น แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานสะสม จะถูกจัดเก็บผ่าน Google Sheet เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พลังงานและคำนวณต้นทุนการชาร์จภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ Time of Use (TOU) ขณะที่ข้อมูลด้านเอาต์พุตกระแสตรง เช่น ค่าแรงดัน กระแส และพฤติกรรมของแบตเตอรี่ระหว่างกระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV จะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูล InfluxDB และแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่าน Grafana Dashboard เพื่อใช้ในการติดตามเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบชาร์จ



รูปที่ 3.1 สถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC ผ่าน CANopen - Modbus RTU

จากรูปที่ 3.1 สถาปัตยกรรมของระบบประกอบด้วยหน่วยสื่อสาร CANopen ที่ติดตั้งร่วมกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ ทำหน้าที่ส่งข้อมูลพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ เช่น ระดับแรงดัน ความจุ และเงื่อนไขการชาร์จ ผ่านเครือข่าย CAN ไปยังโมดูลรับข้อมูลภายในตู้ควบคุม จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งผ่าน MQTT ไปยังระบบ Supervisory control เพื่อให้ Node-RED ประมวลผลและเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่สอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ ก่อนส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยัง

กระบวนการควบคุมในระดับ Execution layer ซึ่งทำหน้าที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จโดยตรง ขณะเดียวกัน ระบบยังเชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi และ MQTT Dashboard เพื่อใช้ในการติดตามสถานะของระบบแบบเรียลไทม์ รวมถึงรองรับการจัดเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะพลังงาน และต้นทุนการชาร์จในภายหลัง

การดำเนินการวิจัยในบทนี้ครอบคลุมการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ การกำหนดโครงสร้างการสื่อสาร การพัฒนากลไกเลือกโปรไฟล์การชาร์จ การควบคุมพารามิเตอร์ในระดับปฏิบัติการ การจัดเก็บและติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ ตลอดจนการออกแบบขั้นตอนการทดลองและเกณฑ์การประเมินผล เพื่อให้สามารถประเมินความถูกต้อง ความเสถียร ความต่อเนื่อง และประสิทธิภาพของระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำได้อย่างเป็นระบบภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

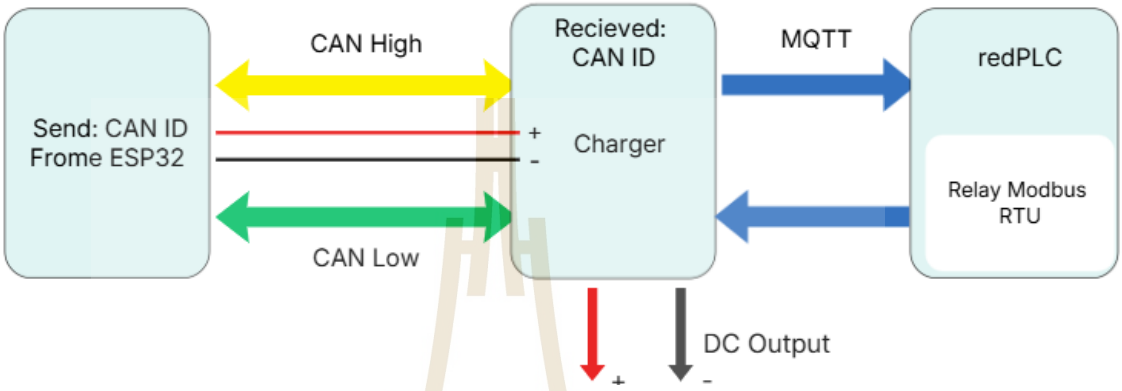
3.2 สถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ

ระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบภายใต้แนวคิดของการบูรณาการระบบกำลังไฟฟ้า ระบบควบคุม ระบบสื่อสาร และระบบติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์เข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำได้อย่างถูกต้อง มีเสถียรภาพ และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการใช้งานจริง โดยสถาปัตยกรรมของระบบถูกแบ่งออกเป็น Communication layer สำหรับรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ Supervisory layer สำหรับประมวลผลและเลือกโปรไฟล์การชาร์จ และ Execution layer สำหรับควบคุมค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการติดตามข้อมูลด้านอินพุตและเอาต์พุตแบบเรียลไทม์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พลังงาน ประเมินต้นทุนการชาร์จ และตรวจสอบเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จในระหว่างการทดลอง

3.2.1 โครงสร้างระบบโดยรวม

โครงสร้างโดยรวมของระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จถูกออกแบบให้รองรับการทำงานของแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดันภายในระบบเดียวกัน โดยอาศัยการบูรณาการระบบสื่อสาร ระบบควบคุม และระบบกำลังไฟฟ้าเข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จและกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จได้อย่างถูกต้องและเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) ระบบเริ่มต้นจากหน่วยส่งข้อมูลที่ติดตั้งร่วมกับแบตเตอรี่ ทำหน้าที่ส่ง CAN Identifier ผ่านเครือข่าย CAN Bus ไปยังหน่วยรับข้อมูลภายในระบบควบคุม จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่าน MQTT ไปยังระบบ Supervisory control เพื่อประมวลผลและเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสม ก่อนถ่ายทอดคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยัง Execution layer สำหรับกำหนดค่ากระแสและแรงดันอ้างอิงของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์

CC-CV โดยแนวทางดังกล่าวช่วยลดความผิดพลาดจากการกำหนดค่าด้วยมนุษย์ เพิ่มความต่อเนื่องในการทำงานของระบบ และช่วยให้การชาร์จแบตเตอรี่สามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ล่วงหน้า



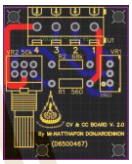
รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen และ Modbus RTU

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าระบบเริ่มต้นจากการส่งข้อมูล CAN ID ผ่านสายสัญญาณ CAN High และ CAN Low ไปยังหน่วยรับข้อมูลของเครื่องชาร์จ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อผ่าน MQTT ไปยังระบบควบคุมส่วนกลางเพื่อประมวลผลและเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ก่อนถ่ายทอดคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยัง execution layer สำหรับกำหนดค่าการทำงานของเครื่องชาร์จ ขณะที่เอาต์พุตกระแสตรงของเครื่องชาร์จจะถูกส่งไปยังแบตเตอรี่เพื่อดำเนินกระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในระบบควบคุม โดยโครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างระบบสื่อสารและระบบกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และรองรับการทำงานของแบตเตอรี่หลายระดับแรงดันภายในสถาปัตยกรรมเดียวกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบชาร์จ

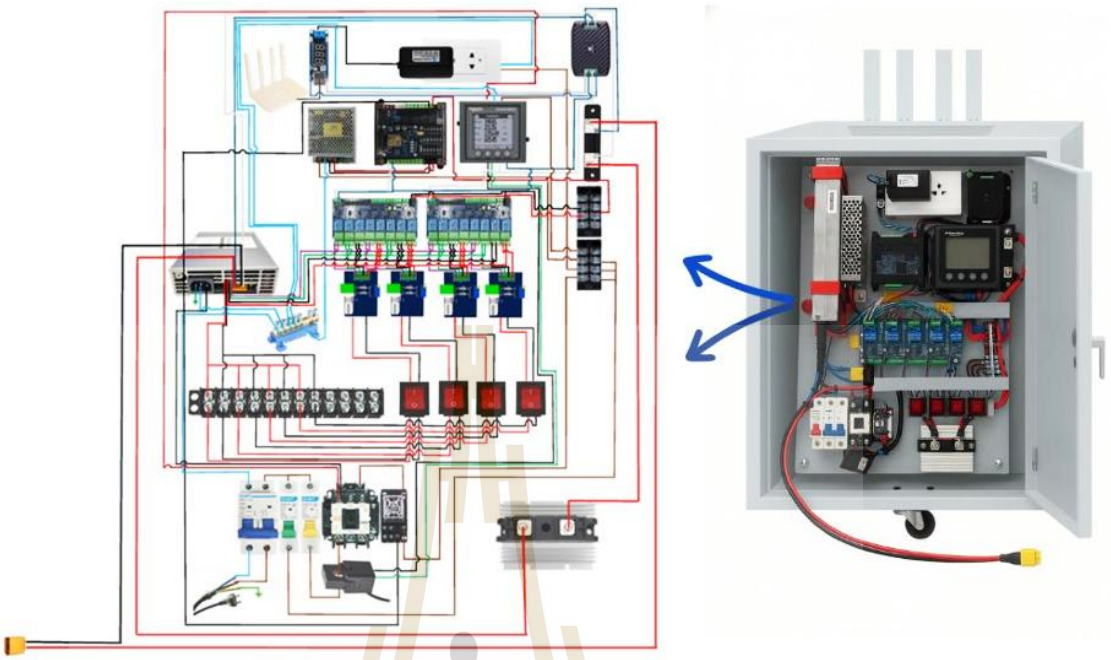
ระบบชาร์จที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ด้านกำลังไฟฟ้า ระบบควบคุม ระบบสื่อสาร และระบบตรวจวัดพลังงาน ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดถูกติดตั้งรวมภายในตู้ควบคุม เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างเป็นระบบ โดยเครื่องชาร์จแบบโปรแกรมได้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักสำหรับกระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ขณะที่ MiniPLC-H3 ทำหน้าที่ควบคุมลำดับการทำงานของระบบ และ RS485 Relay Module ถูกใช้สำหรับเลือกชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดไว้ล่วงหน้า นอกจากนี้ ระบบยังประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดพลังงานด้าน AC และ DC รวมถึงอุปกรณ์สื่อสารสำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างระบบควบคุมและระบบติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบชาร์จแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบชาร์จ

รูปภาพอุปกรณ์	ชื่ออุปกรณ์-พิกัด	รูปภาพอุปกรณ์	ชื่ออุปกรณ์-พิกัด
	เครื่องชาร์จเดลต้า แบบ 0-120V/0-30A		Wi-Fi สำหรับการสื่อสาร MQTT
	รีเลย์ RS-485 จำนวน 8 Channel		เครื่องมือวัด AC Power Meter PM2230
	Mini PLC-H3 หรือ (redPLC/Node-RED)		เครื่องมือวัด DC Power Meter
	แบตเตอรี่แพ็ค NMC พิกัด 3.7V25Ah/Cell		อุปกรณ์ควบคุม Duty Cycle สำหรับ Fixed CC-CV

3.2.3 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบควบคุม

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในตู้ชาร์จถูกออกแบบให้แยกส่วนระหว่างวงจรกำลังไฟฟ้า วงจรควบคุม และระบบสื่อสารอย่างชัดเจน เพื่อลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มเสถียรภาพของระบบควบคุม โดยวงจรกำลังไฟฟ้าทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับเครื่องชาร์จและแบตเตอรี่ ขณะที่วงจรควบคุมทำหน้าที่จัดลำดับการทำงานของระบบและเลือกพารามิเตอร์การชาร์จผ่าน Relay control และ Modbus RTU ส่วนระบบสื่อสารทำหน้าที่เชื่อมโยงข้อมูลระหว่างแบตเตอรี่ ระบบ Supervisory control และระบบติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ การจัดวางอุปกรณ์และการเดินสายภายในตู้ยังถูกออกแบบให้สามารถแยกเส้นทางของสายกำลังไฟฟ้าและสายสื่อสารออกจากกัน เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและเพิ่มความต่อเนื่องในการสื่อสารของระบบควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบควบคุมภายในตู้ชาร์จ

3.3 การพัฒนาเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV สำหรับระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

เพื่อให้ระบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์การชาร์จได้อย่างเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV โดยประยุกต์ใช้เครื่องชาร์จแบบโปรแกรมได้ Delta 0–120 V, 0–30 A ร่วมกับวงจรควบคุมภายนอกที่ออกแบบขึ้นเอง แนวทางดังกล่าวแตกต่างจากการควบคุมผ่านซอฟต์แวร์ทั่วไป เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดค่าความต้านทานของวงจรแรงดัน (CV) และวงจรกระแส (CC) ผ่านฮาร์ดแวร์โดยตรง เพื่อบังคับให้เครื่องชาร์จทำงานตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยได้ทำการถอดวงจรปรับค่าแรงดันและกระแสจากหน้าเครื่องชาร์จออกมาพัฒนาเป็นบอร์ดควบคุมภายนอกสำหรับใช้งานร่วมกับระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จของงานวิจัยนี้

วงจรที่พัฒนาขึ้นถูกออกแบบให้รองรับการชาร์จแบตเตอรี่ NMC จำนวน 4 โปรไฟล์ ได้แก่ 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A โดยแต่ละโปรไฟล์จะถูกกำหนดค่าความต้านทานอ้างอิงของแรงดันและกระแสไว้ล่วงหน้าบนแผงวงจรควบคุม เพื่อให้สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จได้โดยไม่ต้องปรับตั้งใหม่ทุกครั้งที่เปลี่ยนแบตเตอรี่ หลักการดังกล่าวช่วยลดความผิดพลาดจากผู้ปฏิบัติงาน เพิ่มความต่อเนื่องของระบบ และทำให้พารามิเตอร์การชาร์จสามารถถูกบังคับใช้ได้จริงในระดับฮาร์ดแวร์ วงจรควบคุมแรงดันและกระแสเป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรควบคุมแรงดันและกระแสของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV

จากรูปที่ 3.4 แสดงการพัฒนาวงจรควบคุมภายนอกสำหรับกำหนดค่าแรงดันและกระแสอ้างอิงของเครื่องชาร์จ Delta โดยใช้วงจรปรับค่า Duty Cycle ร่วมกับวงจรแบ่งแรงดันและวงจรจำกัดกระแส เพื่อสร้างพารามิเตอร์การชาร์จที่สอดคล้องกับโปรไฟล์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า นอกจากนี้ยังมีการออกแบบแผ่น PCB เพื่อให้สามารถติดตั้งวงจรควบคุมได้อย่างเป็นระบบและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าในระหว่างการทำงานจริง

เพื่อให้ระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้โดยอัตโนมัติ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ Relay Module ที่สื่อสารผ่าน Modbus RTU บนเครือข่าย RS485 สำหรับทำหน้าที่เลือกชุดค่าความต้านทานที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าบนบอร์ดควบคุมของแต่ละโปรไฟล์ โดยรีเลย์จะทำหน้าที่สลับเส้นทางของวงจรแรงดันและกระแสให้ตรงกับเงื่อนไขของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ส่งผลให้เครื่องชาร์จสามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์การทำงานได้โดยอัตโนมัติในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จภายใต้ Execution layer ของระบบควบคุม การเลือกโปรไฟล์การชาร์จแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน Relay RS485 สำหรับระบบฟิกส์ CC-CV

จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่าง Relay RS485 และบอร์ดควบคุมแรงดัน–กระแสของเครื่องชาร์จ โดยระบบจะเลือกชุดค่าความต้านทานที่สอดคล้องกับโปรไฟล์การชาร์จแต่ละชุดผ่านการสั่งงานรีเลย์ ทำให้สามารถกำหนดค่าการชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดันได้อย่างถูกต้องและเป็นเชิงกำหนด นอกจากนี้ แนวทางดังกล่าวยังช่วยให้ระบบสามารถใช้เครื่องชาร์จเพียงเครื่องเดียวรองรับแบตเตอรี่หลายรูปแบบได้ภายใต้โครงสร้างควบคุมเดียวกัน ลดความซับซ้อนของระบบและเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งานจริง

3.3.1 การกำหนด CAN Identifier สำหรับแบตเตอรี่ NMC

ในการออกแบบระบบสื่อสารสำหรับการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ งานวิจัยนี้กำหนดให้แบตเตอรี่แต่ละระบบมี CAN Identifier (CAN ID) เฉพาะ เพื่อใช้เป็นตัวระบุข้อมูลประจำแบตเตอรี่ในเครือข่าย CAN Bus โดยใช้ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลักร่วมกับโมดูล CAN Transceiver สำหรับส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบควบคุม การกำหนด CAN ID ในลักษณะดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถระบุชนิดของแบตเตอรี่และเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสมได้โดยอัตโนมัติ ลดความผิดพลาดจากการตั้งค่าด้วยมนุษย์ และเพิ่มความต่อเนื่องในการทำงานของระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แนวทาง Static Mapping โดยอาศัยค่า Chip ID หรือ MAC Address ของ ESP32 เป็นตัวกำหนด CAN ID ของอุปกรณ์แต่ละชุด เนื่องจาก Chip ID เป็นค่าประจำตัวระดับฮาร์ดแวร์ที่ไม่ซ้ำกัน ทำให้สามารถระบุแบตเตอรี่แต่ละระบบได้อย่างชัดเจน โดยระบบจะอ่านค่า Chip ID เมื่อเริ่มต้นการทำงาน จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับตารางค่า CAN ID ที่ถูกสร้างไว้ล่วงหน้า ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบสื่อสาร CANopen เพื่อใช้ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนด CAN ID สำหรับแบตเตอรี่แต่ละระบบ

CAN ID	ระบบแบตเตอรี่ NMC	โหมดโปรไฟล์การชาร์จ
0x500	24V 5A	Profile 1
0x600	48V 5A	Profile 2
0x700	60V 5A	Profile 3
0x800	72V 15A	Profile 4

ภายหลังจาก ESP32 อ่านค่า Chip ID แล้ว ระบบจะนำค่าดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล CAN ID ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อเลือกหมายเลขประจำตัวของแบตเตอรี่ที่ถูกต้อง ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่าย CAN Bus โดยตัวอย่างโค้ดที่ใช้สำหรับกำหนด CAN ID ของแต่ละระบบแสดงดังรูปที่ 3.6



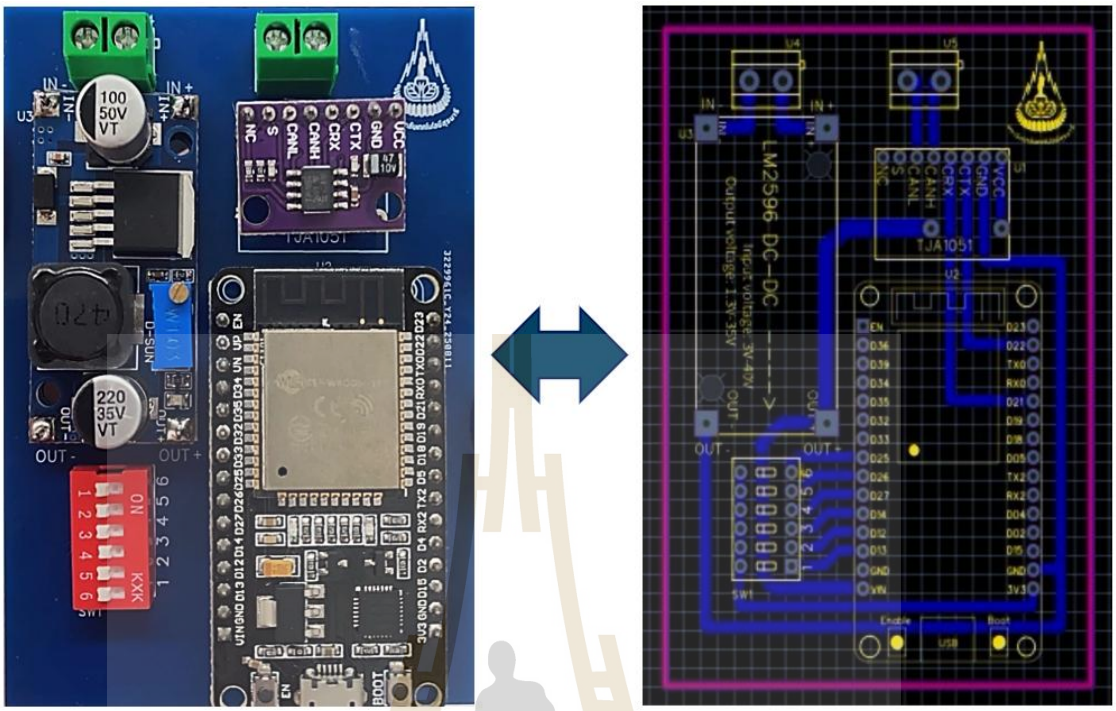
รูปที่ 3.6 การรับและส่ง CAN ID ระหว่างกล่องแบตเตอรี่ NMC และตู้ชาร์จผ่าน CANopen

จากโค้ดข้างต้นจะเห็นได้ว่าแต่ละค่า Chip ID ถูกเชื่อมโยงกับ CAN ID เฉพาะของระบบแบตเตอรี่แต่ละชุด ทำให้ระบบสามารถกำหนดตัวตนของแบตเตอรี่ได้ในระดับฮาร์ดแวร์โดยไม่ต้องพึ่งพาการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน ส่งผลให้การเลือกโปรไฟล์การชาร์จมีความต่อเนื่องและลดความผิดพลาดจากการกำหนดค่าที่ไม่ถูกต้อง

3.3.2 การออกแบบบอร์ดสื่อสาร CANopen สำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาบอร์ดสื่อสาร CANopen สำหรับติดตั้งร่วมกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ เพื่อใช้ในการส่ง CAN Identifier ไปยังตู้ชาร์จสำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบอัตโนมัติ โดยบอร์ดดังกล่าวประกอบด้วย ESP32 สำหรับประมวลผลข้อมูล โมดูล CAN Transceiver รุ่น TJA1051 สำหรับเชื่อมต่อกับเครือข่าย CAN Bus และวงจร DC/DC Converter สำหรับจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ภายในบอร์ด

นอกจากการกำหนด CAN ID แล้ว บอร์ดสื่อสารดังรูป 3.7 ยังถูกออกแบบให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์แรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ผ่าน Diff Switch ซึ่งใช้หลักการ Binary Encoding ในการแปลงสถานะของสวิตช์ให้เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการใช้งานจริง โดยค่าที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลร่วมกับ CAN ID เพื่อใช้ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จในระดับ Supervisory layer



รูปที่ 3.7 บอร์ดสื่อสาร CANopen สำหรับระบุแบตเตอรี่และเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าบอร์ดสื่อสารประกอบด้วยวงจร DC to DC Converter สำหรับจ่ายแรงดันให้กับ ESP32 และโมดูล CAN Transceiver เพื่อเชื่อมต่อกับเครือข่าย CAN Bus ขณะที่ Diff Switch ถูกใช้เป็นอุปกรณ์กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ในระดับฮาร์ดแวร์ ส่งผลให้ระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างเป็นเชิงกำหนดและลดภาระของการประมวลผลในระดับซอฟต์แวร์

3.3.3 การกำหนดพารามิเตอร์ผ่าน Diff Switch

เพื่อให้ระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้ในระดับฮาร์ดแวร์ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบ Diff Switch สำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแรงดันและกระแสผ่าน GPIO ของ ESP32 โดยใช้หลักการ Binary Encoding ในการแปลงสถานะของสวิตช์ให้เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการใช้งานจริง ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถกำหนดค่าการชาร์จได้อย่างรวดเร็ว มีความเสถียร และลดความผิดพลาดจากการตั้งค่าผ่านซอฟต์แวร์

ในส่วนของการกำหนดแรงดันไฟฟ้า ใช้ Diff Switch จำนวน 3 บิต เชื่อมต่อกับ GPIO25, GPIO26 และ GPIO27 ของ ESP32 ขณะที่การกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าใช้ Diff Switch อีก 3 บิต เชื่อมต่อกับ GPIO14, GPIO12 และ GPIO13 ตามลำดับ โดยทุกขาถูกกำหนดให้ทำงานในโหมด INPUT_PULLDOWN เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนในระหว่างการอ่านข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเชื่อมต่อ Diff Switch กับ GPIO ของ ESP32

Diff Switch	ขา GPIO จาก ESP32
S1 - Voltage	GPIO25
S2 - Voltage	GPIO26
S3 - Voltage	GPIO27
S4 - Ampere	GPIO14
S5 - Ampere	GPIO12
S6 - Ampere	GPIO13

ภายหลังจากกำหนดตำแหน่งของ Diff Switch แล้ว ระบบจะทำการอ่านสถานะลอจิกของแต่ละ GPIO และนำค่าไบนารีที่ได้เข้าสู่กระบวนการประมวลผลเพื่อแปลงเป็นค่าระดับแรงดันและกระแสที่ต้องการใช้งานจริง โดยตัวอย่างโค้ดสำหรับอ่านค่าระดับแรงดันแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การกำหนดค่าแรงดันและกระแสของระบบฟิกส์ CC-CV ผ่าน Diff Switch

จากโค้ดข้างต้น ระบบจะอ่านสถานะของ Diff Switch ทั้ง 3 บิตและนำมาเรียงในรูปแบบไบนารีก่อนแปลงเป็นค่าระดับแรงดันที่ต้องการใช้งานจริง เช่น ค่า 0b000 จะถูกกำหนดให้เป็นระบบ 24V ขณะที่ค่า 0b100 จะถูกกำหนดให้เป็นระบบ 72V ส่งผลให้ระบบสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์แรงดันได้โดยไม่ต้องแก้ไขโปรแกรมในระหว่างการใช้งานจริง ในส่วนของการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า ระบบใช้หลักการเดียวกันในการอ่านสถานะของ Diff Switch ผ่าน GPIO14, GPIO12 และ GPIO13 ก่อนแปลงเป็นค่ากระแสที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยตัวอย่างโค้ดสำหรับอ่านค่ากระแส

จากโค้ดข้างต้น ระบบจะทำการแปลงสถานะไบนารีของ Diff Switch ให้เป็นค่ากระแสอ้างอิงของเครื่องชาร์จ ซึ่งช่วยให้สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบชาร์จได้ในระดับฮาร์ดแวร์และลดความซับซ้อนของการประมวลผลในระดับซอฟต์แวร์

3.3.4 กลไกการเลือกโปรไฟล์การชาร์จในระดับระบบ

ภายหลังจากระบบกำหนด CAN ID และอ่านค่าพารามิเตอร์จาก Diff Switch แล้ว ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งเข้าสู่ Supervisory layer ผ่านโปรโตคอล MQTT เพื่อใช้ในการประมวลผลและเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ โดย Node-RED จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการจัดการข้อมูลและกำหนดลำดับการทำงานของระบบ ก่อนส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยัง Relay RS485 สำหรับเลือกชุดค่าความต้านทานของวงจรควบคุมแรงดันและกระแสใน Execution layer

ในระดับ Execution layer รีเลย์แต่ละช่องสัญญาณจะถูกกำหนดให้เชื่อมต่อกับชุดค่าความต้านทานเฉพาะของแต่ละโปรไฟล์การชาร์จ ซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวถูกปรับตั้งไว้ล่วงหน้าบนบอร์ดควบคุมแรงดันและกระแสของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV เมื่อระบบได้รับข้อมูล CAN ID และตรวจสอบความถูกต้องของโปรไฟล์แล้ว ระบบจะสั่งงาน Relay RS485 ให้เลือกเส้นทางของวงจรควบคุมที่ตรงกับพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ส่งผลให้เครื่องชาร์จสามารถกำหนดค่าแรงดันและกระแสได้โดยอัตโนมัติ

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังออกแบบการเชื่อมโยงระหว่าง CAN ID, Modbus Slave ID และช่องสัญญาณรีเลย์ให้ทำงานสัมพันธ์กันในระดับระบบ เพื่อให้สามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างต่อเนื่องและเป็นเชิงกำหนด โดยรายละเอียดของการเชื่อมโยงระหว่าง CAN ID และระบบรีเลย์แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การเชื่อมโยง CAN ID กับระบบรีเลย์ควบคุม

CAN ID	Slave ID	Address (Relay Channel)	Relay RS485
0x500	1	0-3	Relay 1
0x600	1	4-7	Relay 1
0x700	2	0-3	Relay 2
0x800	2	4-7	Relay 2

จากตารางที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าแต่ละ CAN ID ถูกเชื่อมโยงกับ Modbus Slave ID และตำแหน่งรีเลย์ที่แตกต่างกัน ทำให้ระบบสามารถกำหนดโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างชัดเจนและลดความซ้ำซ้อนของการควบคุมภายใน execution layer โดยแนวทางดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถใช้

เครื่องชาร์จเพียงชุดเดียวรองรับแบตเตอรี่หลายระดับแรงดันได้ภายใต้สถาปัตยกรรมเดียวกันลำดับการทำงานของระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสามารถสรุปได้ดังนี้

1) แบตเตอรี่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ
2) ESP32 อ่านค่า Chip ID และสถานะของ Diff Switch
3) ระบบกำหนด CAN ID และค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่
4) ส่งข้อมูลผ่าน CANopen ไปยังตู้ชาร์จ
5) Node-RED รับข้อมูลผ่าน MQTT และประมวลผลโปรไฟล์
6) ส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยัง Relay RS485
7) รีเลย์เลือกชุดค่าความต้านทานของวงจร CC-CV
8) เครื่องชาร์จเริ่มทำงานตามโปรไฟล์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

กลไกดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างเป็นอัตโนมัติ มีความเสถียร และลดความผิดพลาดจากการกำหนดค่าด้วยมนุษย์ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดผ่านโครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบไว้ล่วงหน้า ไม่ได้อาศัยการปรับค่าผ่านซอฟต์แวร์ระหว่างกระบวนการทำงาน ส่งผลให้ Execution layer สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดันภายในระบบเดียวกัน

3.4 การสื่อสารข้อมูลระหว่างแบตเตอรี่และตู้ชาร์จผ่าน CANopen และ MQTT

ระบบสื่อสารที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบเพื่อรองรับการเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำแบบอัตโนมัติ โดยอาศัยการสื่อสารระหว่างกล่องแบตเตอรี่และตู้ชาร์จผ่านโปรโตคอล CANopen ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่ Supervisory layer ผ่าน MQTT เพื่อใช้ในการติดตามและประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ภายในระบบ กล่องแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ส่ง CAN ID พร้อมข้อมูลแรงดันและกระแสเข้าสู่ตู้ชาร์จ ขณะที่ตู้ชาร์จจะทำหน้าที่รับข้อมูล วิเคราะห์โปรไฟล์การชาร์จ และส่งข้อมูลไปยัง Node-RED ผ่านเครือข่าย Wi-Fi เพื่อใช้ในการติดตามสถานะของระบบและควบคุม Execution layer ของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV โดยแนวทางดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้โดยอัตโนมัติ ลดความผิดพลาดจากผู้ปฏิบัติงาน และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารในระดับปฏิบัติการ

3.4.1 การส่งข้อมูล CANopen จากกล่องแบตเตอรี่

ในการเริ่มต้นกระบวนการชาร์จ กล่องแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลประจำตัวของแบตเตอรี่เข้าสู่ตู้ชาร์จทันทีเมื่อมีการเชื่อมต่อสายชาร์จ โดยงานวิจัยนี้ใช้ ESP32 ร่วมกับโมดูล CAN Transceiver รุ่น TJA1051 สำหรับพัฒนาระบบสื่อสารผ่านเครือข่าย CAN Bus ภายใต้มาตรฐาน CAN 2.0B เพื่อใช้เป็น Communication layer สำหรับการระบุโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่

NMC แรงดันต่ำแต่ละระบบ ทั้งนี้ CAN Identifier (CAN ID) ของแบตเตอรี่แต่ละชุดถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าเพื่อใช้เป็นตัวระบุโปรไฟล์การชาร์จ ดังที่ได้กล่าวไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งช่วยให้ตู้ชาร์จสามารถตรวจสอบชนิดของแบตเตอรี่และเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสมได้โดยอัตโนมัติ

ระบบส่งข้อมูล CANopen ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยประกอบด้วย ESP32 สำหรับประมวลผลข้อมูล โมดูล TJA1051 สำหรับเชื่อมต่อกับเครือข่าย CAN Bus และวงจร DC/DC Converter สำหรับจ่ายพลังงานให้กับระบบสื่อสาร ภายใน ESP32 จะทำหน้าที่สร้าง CAN Frame พร้อมกำหนด CAN Identifier และบันทึกข้อมูลแรงดัน–กระแสลงในpayload ของ CAN message ก่อนส่งข้อมูลไปยังตู้ชาร์จผ่านเครือข่าย CAN Bus

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าบอร์ดส่งข้อมูลถูกออกแบบให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบแบตเตอรี่และเครือข่าย CAN Bus ได้โดยตรงผ่านโมดูล TJA1051 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Physical interface ระหว่าง ESP32 และสายสื่อสาร CAN High / CAN Low ขณะที่ ESP32 จะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลและสร้าง CAN Frame สำหรับส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบชาร์จ ทั้งนี้ การเลือกใช้ TJA1051 ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบสื่อสาร ลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน และรองรับการทำงานของระบบในสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้ากำลัง

ภายในระบบ CANopen ข้อมูลแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่จะถูกจัดเก็บอยู่ภายใน payload ของ CAN message โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ข้อมูลแรงดันและกระแสถูกส่งในรูปแบบ floating-point ขนาด 4 ไบต์ต่อหนึ่งพารามิเตอร์ ส่งผลให้ข้อมูลทั้งหมดภายใน CAN payload มีขนาดรวม 8 ไบต์ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดมาตรฐานของ CAN Data Frame ภายใต้ CAN 2.0B โดยข้อมูลแรงดันจะถูกจัดเก็บในตำแหน่ง Byte 0 ถึง Byte 3 ขณะที่ข้อมูลกระแสจะถูกจัดเก็บในตำแหน่ง Byte 4 ถึง Byte 7 ของ Payload ทั้งนี้ การกำหนดรูปแบบข้อมูลในลักษณะดังกล่าวช่วยให้ตู้ชาร์จสามารถแยกข้อมูลแรงดันและกระแสออกจาก CAN message ได้อย่างถูกต้อง และลดความซับซ้อนของกระบวนการประมวลผลข้อมูลภายใน Supervisory layer



รูปที่ 3.9 การส่งข้อมูล CANopen จากกล่องแบตเตอรี่ผ่าน ESP32 ผ่านสาย CAN-high/CAN-low

ภายใน ESP32 งานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชัน memcpy() สำหรับคัดลอกข้อมูลชนิด floating-point ลงใน data field ของ CAN Frame ก่อนส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย CAN Bus ไปยังตู้ชาร์จ โดยแนวทางดังกล่าวช่วยลดปัญหาการแปลงชนิดข้อมูลระหว่างกระบวนการรับส่งข้อมูล และช่วยให้สามารถส่งค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้องภายใต้ Communication layer ของระบบชาร์จ

จากโค้ดข้างต้น ESP32 จะทำการสร้าง CAN message ผ่านโครงสร้าง twai_message_t พร้อมกำหนด CAN Identifier ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ก่อนกำหนด payload ของข้อมูลแรงดันและกระแสผ่านฟังก์ชัน memcpy() และส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่าย CAN Bus ผ่านฟังก์ชัน twai_transmit() โดยภายใน CAN message จะประกอบด้วย Identifier, data length code และ Payload ของข้อมูลแรงดัน–กระแสที่ถูกส่งไปยังตู้ชาร์จแบบ Real-time ส่งผลให้ระบบสามารถระบุโปรไฟล์การชาร์จและติดตามค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่องระหว่างกระบวนการทำงาน นอกจากนี้ การใช้ CANopen ภายใน Communication layer ยังช่วยให้ระบบสามารถรองรับการทำงานร่วมกับ Execution layer ของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อมูลที่ถูกส่งจากกล่องแบตเตอรี่สามารถถูกนำไปใช้ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จและควบคุม Relay RS485 ผ่าน Modbus RTU ได้โดยอัตโนมัติ ส่งผลให้ระบบสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จได้อย่างเป็นเชิงกำหนด ลดความผิดพลาดจากการตั้งค่าด้วยมนุษย์ และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จในระดับปฏิบัติการจริง

3.4.2 การรับข้อมูล CANopen ที่ตู้ชาร์จ

ภายหลังจากกล่องแบตเตอรี่ส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย CAN Bus แล้ว ตู้ชาร์จจะทำหน้าที่รับข้อมูล CANopen ผ่าน ESP32 และโมดูล CAN Transceiver รุ่น TJA1051 เพื่อใช้ในการระบุโปรไฟล์การชาร์จและประมวลผลข้อมูลของแบตเตอรี่ก่อนส่งเข้าสู่ Supervisory layer ของระบบ โดยภายในตู้ชาร์จ ESP32 จะทำงานในโหมด CAN Receive Mode เพื่อรอรับข้อมูลจากเครือข่าย CAN Bus ตลอดเวลา เมื่อมีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่และเริ่มส่ง CAN message ระบบจะทำการตรวจสอบ CAN Identifier และ Payload ของข้อมูลเพื่อใช้ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ

โครงสร้างของระบบรับข้อมูล CANopen ภายในตู้ชาร์จแสดงดังรูปที่ 3.10 โดยประกอบด้วย ESP32 สำหรับประมวลผลข้อมูล โมดูล TJA1051 สำหรับเชื่อมต่อกับเครือข่าย CAN Bus และระบบ Supervisory layer สำหรับประมวลผลข้อมูลก่อนส่งต่อไปยัง Node-RED ผ่าน MQTT ทั้งนี้ TJA1051 ทำหน้าที่เป็น Physical interface สำหรับเชื่อมต่อสัญญาณ CAN High และ CAN Low เข้าสู่ ESP32 เพื่อให้ระบบสามารถรับข้อมูลจากเครือข่าย CAN Bus ได้อย่างมีเสถียรภาพและทนทานต่อสัญญาณรบกวนในระบบกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าตู้ชาร์จทำหน้าที่รับข้อมูล CANopen ผ่านโมดูล TJA1051 ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่ ESP32 เพื่อประมวลผล CAN Identifier และข้อมูลแรงดัน–กระแสของแบตเตอรี่ โดยข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับระบุโปรไฟล์การชาร์จและส่งต่อไปยัง Supervisory layer ผ่าน MQTT เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์และควบคุม Execution layer ของระบบชาร์จ

ภายในระบบรับข้อมูล CANopen งานวิจัยนี้กำหนดให้ ESP32 ตรวจสอบข้อมูล CAN Frame ที่ได้รับจากเครือข่าย CAN Bus ผ่านฟังก์ชัน twai_receive() โดยเมื่อระบบได้รับ CAN message แล้ว ESP32 จะทำการอ่านค่า Identifier และตรวจสอบขนาดของ payload ผ่าน Data length code ก่อนแยกข้อมูลแรงดันและกระแสออกจาก Payload ของ CAN message ผ่านฟังก์ชัน memcpy() ทั้งนี้ การตรวจสอบ Data length code ช่วยลดความผิดพลาดจากการรับข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ และเพิ่มความน่าเชื่อถือของ Communication layer ภายในระบบชาร์จ



รูปที่ 3.10 การรับข้อมูล CANopen ที่ตู้ชาร์จผ่าน ESP32 ผ่านสาย CAN-high/CAN-low

ในการประมวลผลข้อมูล CANopen ภายในตู้ชาร์จ ค่า CAN Identifier ที่ได้รับจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในตารางที่ 3.2 เพื่อใช้ในการกำหนดหมายเลขโปรไฟล์การชาร์จของระบบ ขณะที่ข้อมูลแรงดันและกระแสจะถูกใช้สำหรับติดตามสถานะของแบตเตอรี่และส่งต่อไปยัง Supervisory layer ผ่าน MQTT สำหรับการแสดงผลและจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์

จากโค้ดข้างต้น ESP32 ภายในตู้ชาร์จจะทำการตรวจสอบ CAN message ที่ได้รับจากเครือข่าย CAN Bus ผ่านฟังก์ชัน twai_receive() ก่อนอ่านค่า CAN Identifier และตรวจสอบขนาดของ Payload ผ่าน Data length code หาก Payload มีขนาด 8 ไบต์ตามที่กำหนด ระบบจะใช้ฟังก์ชัน memcpy() สำหรับแยกข้อมูลแรงดันและกระแสออกจาก Payload ของ CAN message ก่อนนำข้อมูลไปใช้สำหรับระบุโปรไฟล์การชาร์จและติดตามสถานะของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ ภายใน Execution layer ของระบบ ข้อมูล CAN ID ที่ได้รับจากแบตเตอรี่ยังถูกใช้สำหรับเชื่อมโยงไปยังระบบควบคุม Relay RS485 ผ่าน Modbus RTU เพื่อเลือกชุดค่าความต้านทานของวงจรควบคุม CC-CV ที่สอดคล้องกับโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ส่งผลให้ระบบสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จได้อย่างเป็นเชิงกำหนดโดยไม่ต้องอาศัยการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน ทั้งนี้แนวทางดังกล่าวช่วยเพิ่มความต่อเนื่องในการทำงานของระบบ ลดความผิดพลาดจากการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ และเพิ่มความน่าเชื่อถือของ Execution layer สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดันภายในระบบเดียวกัน

3.4.3 การส่งข้อมูล MQTT ไปยัง Node-RED

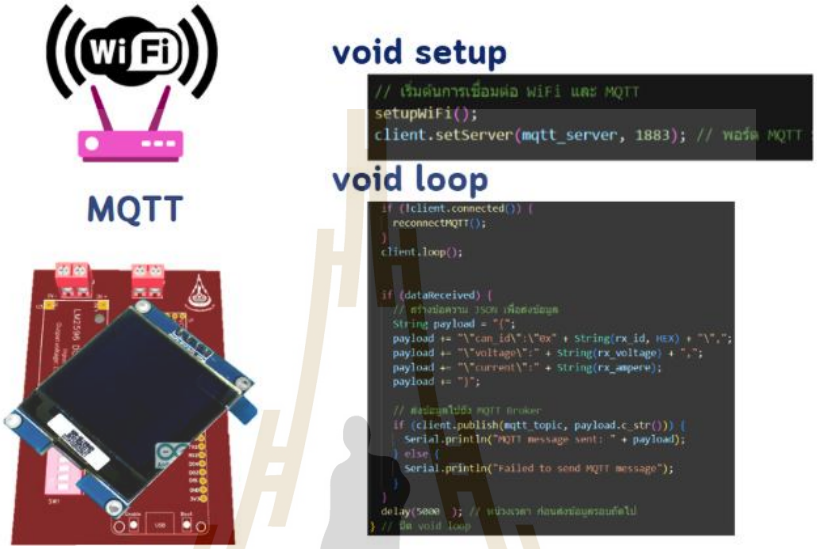
ภายหลังจากตู้ชาร์จได้รับข้อมูล CANopen และประมวลผลข้อมูลของแบตเตอรี่แล้ว ระบบจะส่งข้อมูล CAN ID, Voltage และ Current ไปยัง Node-RED ผ่านโปรโตคอล MQTT เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์และจัดการ Supervisory control ของระบบชาร์จ โดย MQTT ถูกเลือกใช้งานเนื่องจากเป็นโปรโตคอลแบบ Publish/Subscribe ที่รองรับการสื่อสารผ่านเครือข่าย Wi-Fi มีขนาดข้อมูลต่ำ และเหมาะสมกับระบบ IoT ที่ต้องการรับส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่องภายใต้ Distributed control architecture

ภายในระบบตู้ชาร์จจะทำหน้าที่เป็น MQTT Client สำหรับเชื่อมต่อกับ MQTT Broker ผ่านเครือข่าย Wi-Fi ก่อน publish ข้อมูลจากระบบ CANopen ไปยัง Supervisory layer ขณะที่ Node-RED จะทำหน้าที่ Subscribe ข้อมูลจาก MQTT Broker เพื่อใช้ในการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ วิเคราะห์สถานะของระบบ และควบคุม Execution layer ของเครื่องชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV ต่อไป โดยแนวทางดังกล่าวช่วยให้ Communication layer และ Supervisory layer สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างต่อเนื่องภายใต้ระบบสื่อสารเดียวกัน

โครงสร้างของระบบส่งข้อมูล MQTT จากตู้ชาร์จไปยัง Node-RED แสดงดังรูปที่ 3.10 โดย ESP32 ภายในตู้ชาร์จจะทำหน้าที่เชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi และสร้างข้อมูลในรูปแบบ JSON payload ก่อนส่งข้อมูลผ่าน MQTT Broker ไปยัง Node-RED เพื่อใช้ในการติดตามสถานะของแบตเตอรี่และระบบชาร์จแบบเรียลไทม์

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าตู้ชาร์จทำหน้าที่ Publish ข้อมูลจากระบบ CANopen ไปยัง MQTT Broker ผ่านเครือข่าย Wi-Fi ก่อนส่งต่อไปยัง Node-RED เพื่อใช้ในการแสดงผลและ

ติดตามสถานะของระบบแบบเรียลไทม์ โดยข้อมูลที่ถูกส่งประกอบด้วย CAN ID ค่าแรงดัน และค่ากระแสของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ซึ่งถูกจัดเก็บในรูปแบบ JSON payload เพื่อให้ง่ายต่อการประมวลผลภายใน Supervisory layer



รูปที่ 3.11 การส่งข้อมูล CAN ID, Voltage และ Current ไปยัง Node-RED ผ่าน MQTT

ในงานวิจัยนี้ ESP32 ภายในตู้ชาร์จจะทำหน้าที่เชื่อมต่อกับ MQTT Broker ผ่านไลบรารี PubSubClient โดยระบบจะทำการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อกับ MQTT Broker อย่างต่อเนื่อง หากการเชื่อมต่อถูกตัดขาด ระบบจะทำการ reconnect อัตโนมัติเพื่อรักษาความต่อเนื่องของการสื่อสารข้อมูลระหว่าง communication layer และ supervisory layer ทั้งนี้ การออกแบบในลักษณะดังกล่าวช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบสื่อสารและลดโอกาสการสูญหายของข้อมูลระหว่างกระบวนการชาร์จ ข้อมูลที่ถูกส่งผ่าน MQTT จะอยู่ในรูปแบบ JSON payload ซึ่งประกอบด้วยค่า CAN ID ค่าแรงดัน และค่ากระแสของแบตเตอรี่ โดย CAN ID จะถูกใช้เป็นตัวระบุโปรไฟล์การชาร์จ ขณะที่ข้อมูลแรงดันและกระแสจะถูกใช้สำหรับติดตามสถานะของระบบและประเมินสมรรถนะของกระบวนการชาร์จในระหว่างการทดลอง ทั้งนี้ งานวิจัยนี้กำหนดให้ Node-RED subscribe ข้อมูลผ่าน MQTT Topic ที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อให้ supervisory layer สามารถแยกประเภทข้อมูลและประมวลผลได้อย่างถูกต้อง

จาก JSON payload ข้างต้น จะเห็นได้ว่าข้อมูล CAN ID, Voltage และ Current ถูกจัดเก็บในรูปแบบ key-value structure ซึ่งช่วยให้ Node-RED สามารถอ่านข้อมูลและแยกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ออกจาก payload ได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้ การใช้ JSON ยังช่วยให้ระบบสามารถขยายโครงสร้างข้อมูลเพิ่มเติมในอนาคตได้โดยไม่กระทบต่อ communication layer เดิม

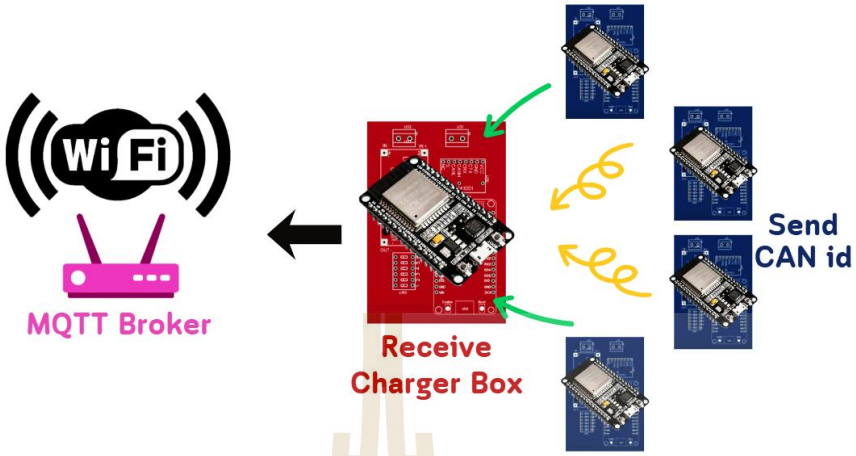
ภายใน Node-RED ระบบจะทำการ subscribe ข้อมูลจาก MQTT Broker ผ่าน topic ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่ dashboard visualization และระบบฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ โดยข้อมูลแรงดันและกระแสที่ได้รับจาก MQTT จะถูกใช้สำหรับติดตามสถานะของแบตเตอรี่ ประเมินพฤติกรรมของกระบวนการชาร์จ และใช้ในการวิเคราะห์พลังงานของระบบในขั้นตอนถัดไปของงานวิจัย

จากโค้ดข้างต้น ESP32 ภายในตู้ชาร์จจะทำการสร้าง JSON payload จากข้อมูล CAN ID ค่าแรงดัน และค่ากระแสที่ได้รับจากระบบ CANopen ก่อน publish ข้อมูลผ่าน MQTT Broker ไปยัง Node-RED ผ่านเครือข่าย Wi-Fi โดยภายใน supervisory layer ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับติดตามสถานะของแบตเตอรี่ แสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และเชื่อมโยงเข้าสู่ execution layer ของระบบฟิกส์ CC-CV เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบอย่างต่อเนื่องและเป็นเชิงกำหนด

3.5 โครงสร้างการแลกเปลี่ยนข้อมูลสำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกล่องแบตเตอรี่และตู้ชาร์จเพื่อใช้สำหรับระบุโปรไฟล์การชาร์จและส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบควบคุมแบบฟิกส์ CC-CV โดยระบบถูกออกแบบภายใต้แนวคิดของ Distributed communication architecture ซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็น Communication layer, Supervisory layer และ Execution layer เพื่อให้การรับส่งข้อมูลและการควบคุมระบบสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างต่อเนื่องและเป็นเชิงกำหนด ทั้งนี้ กล่องแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ส่งข้อมูล CANopen ผ่านเครือข่าย CAN Bus ไปยังตู้ชาร์จ ขณะที่ตู้ชาร์จจะทำหน้าที่รับข้อมูล CAN ID และข้อมูลแรงดัน–กระแส ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่ Node-RED ผ่าน MQTT เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์และเชื่อมโยงไปยังระบบควบคุมการชาร์จ

ภายในโครงสร้างดังกล่าว CANopen ถูกใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างกล่องแบตเตอรี่และตู้ชาร์จ เนื่องจากรองรับการสื่อสารแบบ Real-time communication และมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนในระบบกำลังไฟฟ้า ขณะที่ MQTT ถูกใช้เป็นโปรโตคอลสำหรับส่งข้อมูลเข้าสู่ Supervisory layer ผ่านเครือข่าย Wi-Fi เพื่อให้ Node-RED สามารถติดตามข้อมูลของระบบและจัดการข้อมูลภายใน Execution layer ได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ ข้อมูล CAN ID ที่ได้รับจากแบตเตอรี่จะถูกใช้สำหรับระบุโปรไฟล์การชาร์จและเชื่อมโยงไปยังระบบควบคุมฟิกส์ CC-CV ผ่าน Relay RS485 และ Modbus RTU ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การสื่อสารข้อมูลจาก CAN Bus สู่ระบบ redPLC-NodeRED ผ่านโปรโตคอล MQTT

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าระบบเริ่มต้นจากกล่องแบตเตอรี่ทำการส่ง CAN ID ผ่านเครือข่าย CAN Bus ไปยังตู้ชาร์จ เมื่อ ESP32 ภายในตู้ชาร์จได้รับข้อมูลแล้ว ระบบจะทำการประมวลผลข้อมูล CANopen ก่อนสร้างข้อมูลในรูปแบบ JSON payload และส่งข้อมูล CAN ID, Voltage และ Current ผ่าน MQTT Broker ไปยัง Node-RED ผ่านเครือข่าย Wi-Fi เพื่อใช้ในการติดตามสถานะของแบตเตอรี่และเชื่อมโยงเข้าสู่ Execution layer ของระบบฟิกส์ CC-CV สำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ

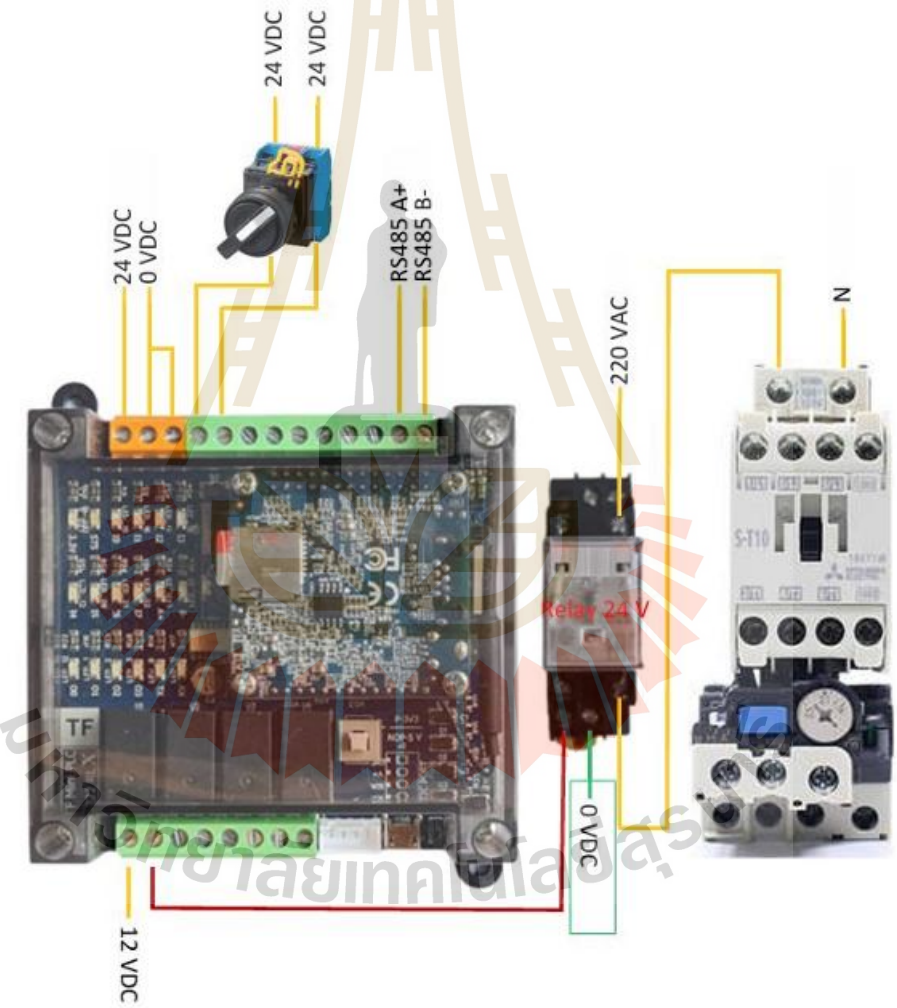
3.6 การพัฒนาระบบควบคุมด้วย Mini PLC-H3 (redPLC or Node-RED)

ภายหลังจากระบบสามารถรับ–ส่งข้อมูลระหว่างกล่องแบตเตอรี่และตู้ชาร์จผ่าน CANopen และ MQTT ได้แล้ว งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบควบคุมฝั่ง Hardware โดยใช้ Mini PLC-H3 หรือ redPLC เป็น Execution controller หลักสำหรับควบคุมการทำงานของระบบฟิกส์ CC-CV ภายในตู้ชาร์จ ทั้งนี้ redPLC จะทำหน้าที่รับข้อมูลโปรไฟล์การชาร์จจาก Supervisory layer ก่อนส่งคำสั่งควบคุมไปยังอุปกรณ์ภายในระบบผ่านโปรโตคอล Modbus RTU บนเครือข่าย RS485 เพื่อใช้สำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ควบคุม Relay Module และเชื่อมโยงข้อมูลกับอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้าภายในระบบ

ในการพัฒนาระบบดังกล่าว งานวิจัยนี้เลือกใช้ Mini PLC-H3 เนื่องจากสามารถรองรับการสื่อสารผ่าน RS485 ได้โดยตรง มี Digital Output สำหรับควบคุม Relay และสามารถทำงานร่วมกับ Node-RED ผ่าน Modbus RTU ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ redPLC ยังถูกใช้เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Power Meter ผ่านอินเทอร์เฟซ RS485 เพื่ออ่านค่าพลังงานไฟฟ้า แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของระบบชาร์จ ทั้งนี้การออกแบบในลักษณะดังกล่าวช่วยให้ Execution

layer และ monitoring layer สามารถทำงานร่วมกันผ่านโครงสร้างการสื่อสารเดียวกันได้อย่างต่อเนื่อง

โครงสร้างของระบบควบคุมผ่าน Mini PLC-H3 แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยภายในระบบใช้ redPLC เชื่อมต่อกับ Relay RS485 ผ่านเครือข่าย RS485 Bus เพื่อควบคุมวงจรฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้าจำนวน 4 โปรไฟล์ ประกอบด้วย 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ทั้งนี้ Relay Module แต่ละชุดจะเชื่อมต่อกับวงจรค่าความต้านทานของระบบควบคุมแรงดันและกระแส ซึ่งถูกกำหนดค่าไว้ล่วงหน้าเพื่อใช้สำหรับเลือกค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จให้ตรงกับโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ



รูปที่ 3.13 การเชื่อมต่อ Mini PLC-H3 ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันฝั่งกำลังของเครื่องชาร์จ

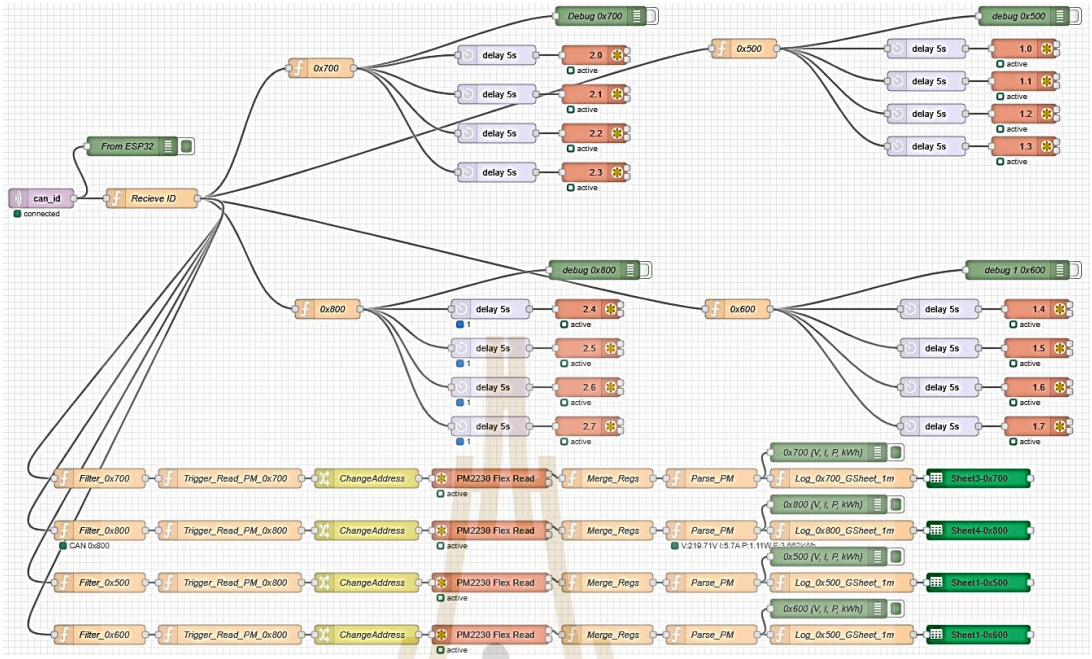
จากรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าระบบใช้ redPLC เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุม Relay RS485 ผ่านเครือข่าย RS485 Bus โดย Relay แต่ละชุดจะทำหน้าที่เลือกวงจรค่าความต้านทานของระบบ

ฟิกส์ CC-CV สำหรับควบคุมค่าแรงดันคงที่ (Constant Voltage: CV) และค่ากระแสคงที่ (Constant Current: CC) ของเครื่องชาร์จเดลต้าให้สอดคล้องกับโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน ทั้งนี้ redPLC ยังสามารถเชื่อมต่อกับ Power Meter ผ่านอินเทอร์เฟซ RS485 เดียวกันเพื่ออ่านค่าพลังงานไฟฟ้าและส่งข้อมูลเข้าสู่ Supervisory layer ผ่าน Node-RED ได้อีกด้วย ส่งผลให้ระบบสามารถควบคุมและติดตามสถานะของระบบชาร์จได้ภายใต้ execution layer เดียวกันอย่างมีเสถียรภาพ

3.6.1 การพัฒนาระบบ Supervisory Control บน Node-RED

ระบบ Supervisory Control ถูกพัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์ม Node-RED เพื่อใช้เป็นศูนย์กลางในการประมวลผลข้อมูล การจัดการเส้นทางการทำงานของระบบ และการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่าง Communication layer และ Execution layer ของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ โดย Node-RED จะทำหน้าที่รับข้อมูลจาก ESP32 ภายในตู้ชาร์จผ่านโปรโตคอล MQTT ก่อนนำข้อมูล CAN ID, Voltage และ Current มาประมวลผลเพื่อใช้ในการระบุโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ทั้งนี้ข้อมูล CAN ID ที่ได้รับจาก Communication layer จะถูกใช้เป็นตัวแยกเส้นทางการทำงาน (Routing Path) ภายใน Node-RED เพื่อเลือกการทำงานของ Execution layer ให้สอดคล้องกับโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน นอกจากนี้ Node-RED ยังทำหน้าที่เป็น Supervisory controller สำหรับควบคุมลำดับการทำงานของระบบทั้งหมด ตั้งแต่การรับข้อมูลจาก communication layer การเลือกโปรไฟล์การชาร์จ การส่งคำสั่งไปยัง redPLC ไปจนถึงการจัดเก็บข้อมูลของระบบชาร์จเข้าสู่ฐานข้อมูลและระบบวิเคราะห์ข้อมูล

ภายใน Supervisory layer ของระบบ Node-RED ถูกออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์หลายชนิดภายใต้โครงสร้างการสื่อสารเดียวกัน โดยระบบจะทำการ Subscribe ข้อมูลจาก MQTT Broker อย่างต่อเนื่องเพื่อติดตามสถานะของแบตเตอรี่แบบ Real-time เมื่อได้รับข้อมูล CAN ID แล้ว ระบบจะทำการตรวจสอบหมายเลขประจำตัวของแบตเตอรี่และแยกเส้นทางข้อมูลเข้าสู่โปรไฟล์การชาร์จที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ก่อนส่งคำสั่งไปยัง Mini PLC-H3 (redPLC) ผ่าน Modbus RTU เพื่อควบคุม Relay RS485 สำหรับเลือกวงจรฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้า นอกจากนี้ Node-RED ยังถูกใช้สำหรับอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าจาก Power Meter รุ่น PM2200 ผ่านเครือข่าย RS485 เพื่อเก็บข้อมูลแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของระบบชาร์จ ทั้งนี้ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บเข้าสู่ Google Sheets และระบบฐานข้อมูลสำหรับใช้ในการติดตามสถานะของระบบ วิเคราะห์พฤติกรรมการชาร์จ และประเมินสมรรถนะของระบบในขั้นตอนถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การพัฒนาระบบ Supervisory Control บน Node-RED สำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จและติดตามข้อมูลพลังงาน

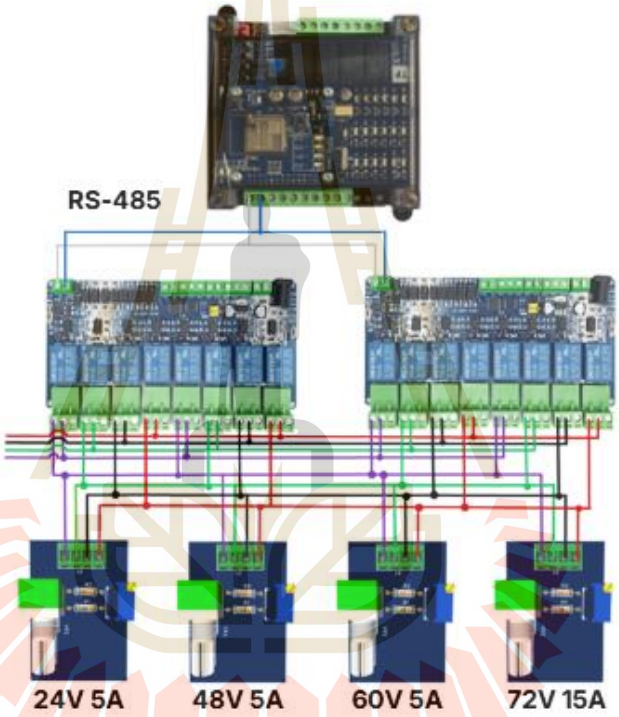
จากรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของ Node-RED ถูกแบ่งออกเป็นหลายส่วนตามหน้าที่การทำงานของระบบ โดยส่วนแรกทำหน้าที่รับข้อมูล MQTT จาก ESP32 ผ่าน MQTT Broker ก่อนนำข้อมูล CAN ID เข้าสู่กระบวนการตรวจสอบและแยกเส้นทางข้อมูลตามโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ขณะที่ส่วนกลางของระบบจะทำหน้าที่ควบคุม Execution layer ผ่าน redPLC และอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าจาก PM2200 ผ่าน Modbus RTU ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการแยกและจัดรูปแบบข้อมูล (Data Parsing) สำหรับสร้างข้อมูลด้านแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของระบบชาร์จ ทั้งนี้ส่วนสุดท้ายของระบบจะทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลเข้าสู่ Google Sheets และระบบฐานข้อมูลสำหรับใช้ในการติดตามสถานะของระบบและวิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ในระดับ Supervisory layer ต่อไป

3.6.2 การควบคุม Relay RS485 สำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

ภายใน Execution layer ของระบบ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการควบคุมโปรไฟล์การชาร์จผ่าน Relay RS485 โดยใช้ Mini PLC-H3 (redPLC) เป็นอุปกรณ์หลักในการส่งคำสั่ง Modbus RTU เพื่อเลือกวงจรฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้าให้สอดคล้องกับโปรไฟล์ของแบตเตอรี่ NMC แต่ละระดับแรงดัน ทั้งนี้เมื่อ Node-RED ได้รับข้อมูล CAN ID จาก Communication layer แล้ว ระบบ Supervisory control จะทำการประมวลผลข้อมูลและส่งคำสั่งไปยัง redPLC ผ่านเครือข่าย

RS485 เพื่อเลือกช่องสัญญาณของ Relay Module สำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์แรงดันและกระแสของเครื่องชาร์จ

โครงสร้างของระบบควบคุม Relay RS485 แสดงดังรูปที่ 3.15 โดยภายในระบบใช้ redPLC เชื่อมต่อกับ Relay Module จำนวน 2 ชุดผ่านอินเทอร์เฟซ RS485 เพื่อควบคุมวงจรฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้าจำนวน 4 โปรไฟล์ ประกอบด้วย 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ทั้งนี้ Relay แต่ละช่องจะเชื่อมต่อกับชุดค่าความต้านทานของวงจรควบคุมแรงดันและกระแส ซึ่งถูกกำหนดค่าไว้ล่วงหน้าตามโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ

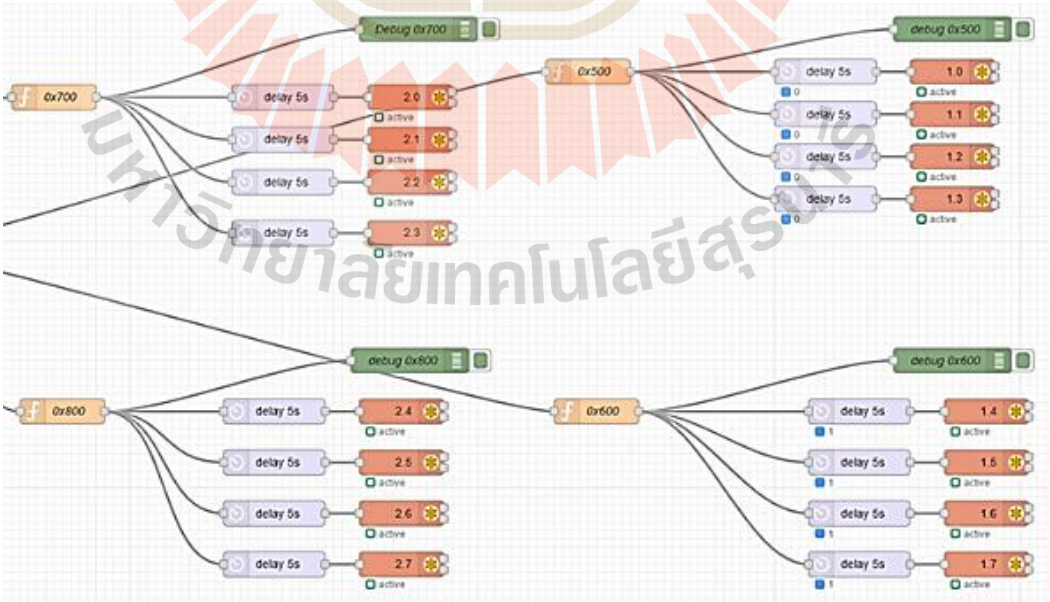


รูปที่ 3.15 การควบคุม Relay RS485 สำหรับเลือกโปรไฟล์ฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้า

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าระบบใช้เครือข่าย RS485 เป็น Communication interface สำหรับเชื่อมต่อระหว่าง redPLC และ Relay Module โดย Relay Module ชุดแรกทำหน้าที่ควบคุมโปรไฟล์ 24V 5A และ 48V 5A ขณะที่ Relay Module ชุดที่สองใช้สำหรับควบคุมโปรไฟล์ 60V 5A และ 72V 15A ทั้งนี้เมื่อ redPLC ได้รับคำสั่งจาก Node-RED ระบบจะทำการเลือกช่องสัญญาณของรีเลย์เพื่อเชื่อมต่อวงจรค่าความต้านทานของระบบฟิกส์ CC-CV ให้ตรงกับโปรไฟล์ของแบตเตอรี่ ส่งผลให้เครื่องชาร์จสามารถกำหนดค่าแรงดันคงที่ (Constant Voltage: CV) และค่ากระแสคงที่ (Constant Current: CC) ได้ตามพารามิเตอร์ที่ออกแบบไว้ล่วงหน้า ภายในงานวิจัยนี้

การเลือกใช้ Relay RS485 ร่วมกับ Modbus RTU ช่วยให้ระบบสามารถควบคุม Execution layer ได้อย่างเป็นเชิงกำหนด ลดความซับซ้อนของวงจรควบคุม และเพิ่มความยืดหยุ่นในการกำหนดโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่หลายระดับแรงดันภายในตู้ชาร์จเดียวกัน นอกจากนี้ การใช้ค่าความต้านทานแบบ Fixed parameter selection ยังช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการปรับค่าด้วยซอฟต์แวร์ และเพิ่มเสถียรภาพของระบบฟิกส์ CC-CV สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระดับปฏิบัติการจริง

ภายหลังจาก Node-RED ทำการตรวจสอบและคัดแยก CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละระบบแล้ว ระบบจะเข้าสู่กระบวนการ Trigger execution layer เพื่อเลือกโปรไฟล์การชาร์จของเครื่องชาร์จเดลต้าผ่าน Relay RS485 โดย Node-RED จะทำหน้าที่ส่งคำสั่ง Modbus RTU ไปยัง Mini PLC-H3 (redPLC) ผ่านอินเทอร์เฟซ RS485 ก่อนที่ redPLC จะทำการเลือกช่องสัญญาณของ Relay Module ให้ตรงกับโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์แรงดันและกระแสของเครื่องชาร์จผ่านวงจรฟิกส์ CC-CV ได้อย่างเป็นเชิงกำหนด ลำดับการ Trigger Relay RS485 ภายหลังการคัดแยก CAN ID แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยภายใน Node-RED ระบบจะใช้ฟังก์ชันตรวจสอบค่า CAN ID เพื่อแยกเส้นทางข้อมูลของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ก่อนส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยัง redPLC เพื่อ activate ช่องสัญญาณของ Relay Module ตามโปรไฟล์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ทั้งนี้แต่ละโปรไฟล์จะเชื่อมโยงกับชุดค่าความต้านทานของวงจร CC-CV ที่แตกต่างกันสำหรับควบคุมค่าแรงดันคงที่และค่ากระแสคงที่ของเครื่องชาร์จเดลต้า



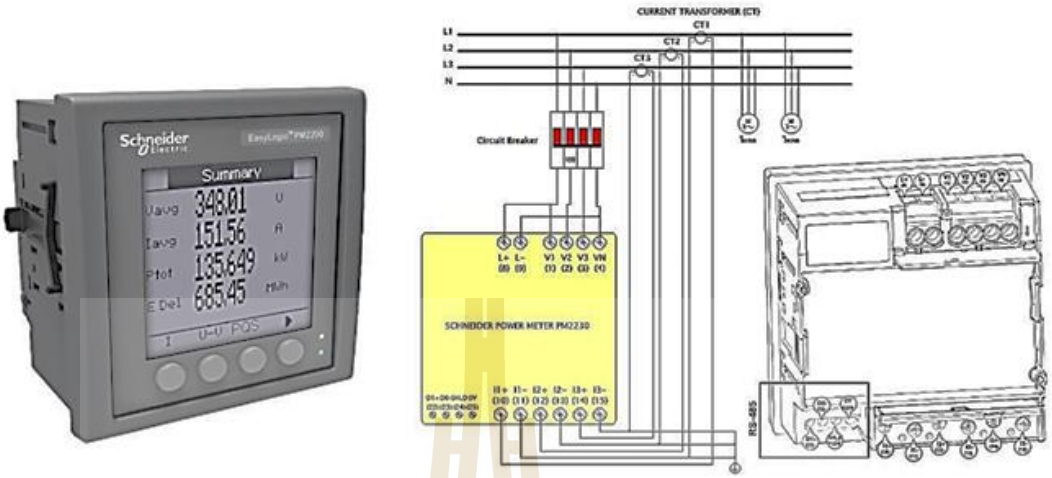
รูปที่ 3.16 ลำดับการ Trigger Relay RS485 ภายหลังการคัดแยก CAN ID สำหรับฟิกส์ค่า CC-CV

จากรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าภายใน Node-RED ระบบถูกออกแบบให้สามารถแยกเส้นทางข้อมูลของ CAN ID แต่ละระบบออกจากกันอย่างชัดเจน โดยหลังจากตรวจสอบหมายเลข CAN ID แล้ว ระบบจะส่งคำสั่ง Modbus RTU ผ่าน RS485 Interface ไปยัง Relay Module เพื่อเลือกช่องสัญญาณของระบบฟิกส์ CC-CV ให้ตรงกับโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน เช่น 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ส่งผลให้ Execution layer ของระบบสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จได้อย่างต่อเนื่องและลดความผิดพลาดจากการเลือกโปรไฟล์การชาร์จภายในระบบเดียวกัน

3.6.3 การติดตามและบันทึกข้อมูลพลังงานฝั่ง AC ของระบบชาร์จ

ภายในงานวิจัยนี้ ระบบติดตามข้อมูลพลังงานฝั่งกระแสสลับ (AC Side Measurement) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องชาร์จเดลต้า วิเคราะห์สมรรถนะของระบบชาร์จ และใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของ Execution layer ภายในระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ ทั้งนี้การตรวจวัดพลังงานฝั่ง AC มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องชาร์จและพฤติกรรมของระบบฟิกส์ CC-CV โดยเฉพาะในช่วง Constant Current (CC) และ Constant Voltage (CV) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตลอดกระบวนการชาร์จ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากระบบตรวจวัดจึงถูกใช้สำหรับติดตามสถานะของระบบ วิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงาน และประเมินสมรรถนะของเครื่องชาร์จในแต่ละโปรไฟล์การชาร์จ

ในการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC งานวิจัยนี้เลือกใช้ Power Meter รุ่น PM2200 สำหรับติดตั้งบริเวณด้าน Input ของเครื่องชาร์จเดลต้า โดยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่สำคัญ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) กำลังไฟฟ้า (Active Power) และพลังงานไฟฟ้าสะสม (Energy) ผ่าน Current Transformer (CT) ที่ติดตั้งบริเวณสายป้อนของระบบ ทั้งนี้ PM2200 สามารถสื่อสารข้อมูลผ่านโปรโตคอล Modbus RTU บนเครือข่าย RS485 ทำให้สามารถเชื่อมโยงข้อมูลเข้าสู่ supervisory layer ของระบบได้โดยตรง นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จาก PM2200 ยังถูกใช้สำหรับประเมินความต่อเนื่องของระบบชาร์จ ตรวจสอบพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องชาร์จ และใช้สำหรับเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าระหว่างแต่ละโปรไฟล์การชาร์จภายในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การติดตามพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ด้วย PM2200 ผ่าน Modbus RTU

จากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่ามิเตอร์ PM2200 ถูกติดตั้งอยู่ด้าน Input ของเครื่องชาร์จเดลต้าเพื่อใช้สำหรับตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC โดยระบบจะใช้ Current Transformer (CT) สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องชาร์จ ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสมจะถูกประมวลผลภายในมิเตอร์ก่อนส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย RS485 ไปยัง Node-RED ผ่านโปรโตคอล Modbus RTU ทั้งนี้ข้อมูลที่ถูกตรวจวัดจะถูกใช้สำหรับติดตามพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องชาร์จในแต่ละช่วงของกระบวนการชาร์จ รวมถึงใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับประเมินสมรรถนะของ Execution layer ภายในระบบชาร์จ

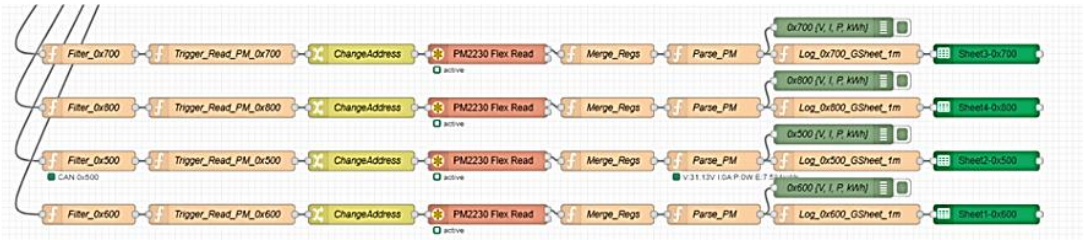
ในการอ่านค่าพลังงานจาก PM2200 งานวิจัยนี้กำหนดให้ Node-RED อ่านข้อมูลผ่านรีจิสเตอร์ของ Modbus RTU ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าแต่ละชนิดจะถูกจัดเก็บอยู่ภายใน Address ของรีจิสเตอร์ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ข้อมูลที่ใช้ภายในงานวิจัยประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสม โดยข้อมูลทั้งหมดถูกจัดเก็บในรูปแบบ 32-bit Register เพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบชาร์จ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การแมปรีจิสเตอร์ Modbus RTU สำหรับตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ของ PM2200

พารามิเตอร์	Address (Register)	จำนวน Register	หน่วย	หมายเหตุ
แรงดันไฟฟ้า Voltage: V	3027-3028	2 (32 bits)	V	ค่าเฉลี่ยแรงดันระบบ (Line to Line)
กระแสไฟฟ้า Current: I	3001-3002	2 (32 bits)	A	ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า
กำลังไฟฟ้า Active Power: P	3053-3054	2 (32 bits)	kW	กำลังไฟฟ้าจริงของระบบ
พลังงานไฟฟ้า Energy: kWh	3203-3204	2 (32 bits)	kWh	พลังงานสะสม

จากตารางที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบถูกจัดเก็บอยู่ที่รีจิสเตอร์ Address 3027–3028 ขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าจะอยู่ที่ Address 3001–3002 ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบจะถูกอ่านจาก Address 3053–3054 และค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมจะถูกจัดเก็บอยู่ที่ Address 3203–3204 ทั้งนี้ Node-RED จะทำหน้าที่อ่านค่าข้อมูลจากรีจิสเตอร์ดังกล่าวผ่าน Modbus RTU ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการรวมข้อมูล (Merge Register) และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้ภายใน supervisory layer ของระบบชาร์จต่อไป

ภายใน Supervisory layer งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบบน Node-RED สำหรับอ่านค่าพลังงานจาก PM2200 แบบ real-time โดย Node-RED จะทำหน้าที่ Trigger การอ่านค่าจากมิเตอร์ผ่าน Modbus RTU ตาม CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ก่อนนำข้อมูลรีจิสเตอร์เข้าสู่กระบวนการรวมข้อมูล (Merge Register) และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้ภายในระบบ ทั้งนี้ข้อมูลที่ถูกประมวลผลจะประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสม ก่อนถูกส่งเข้าสู่ระบบฐานข้อมูลและ dashboard สำหรับใช้ในการติดตามสถานะของระบบแบบ Real-time ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การอ่านและบันทึกข้อมูลพลังงานจาก PM2200 บน Node-RED

จากรูปที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าภายใน Node-RED ระบบถูกออกแบบให้สามารถแยกเส้นทางการอ่านค่าพลังงานตาม CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ โดยเมื่อระบบได้รับข้อมูล CAN ID จาก Communication layer แล้ว Node-RED จะทำการ Trigger การอ่านข้อมูลจาก PM2200 ผ่าน Modbus RTU ก่อนเข้าสู่กระบวนการ Parse ข้อมูลเพื่อแยกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าออกจากรีจิสเตอร์ของมิเตอร์ จากนั้นระบบจะทำการจัดเก็บข้อมูลเข้าสู่ Google Sheets แยกตามโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ เช่น 0x500, 0x600, 0x700 และ 0x800 ทั้งนี้งานวิจัยนี้กำหนดให้ระบบทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 นาที เพื่อใช้สำหรับติดตามพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องชาร์จในระหว่างกระบวนการชาร์จแบบ Real-time และใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับวิเคราะห์สถานะการชาร์จและการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อการชาร์จในขั้นตอนถัดไป

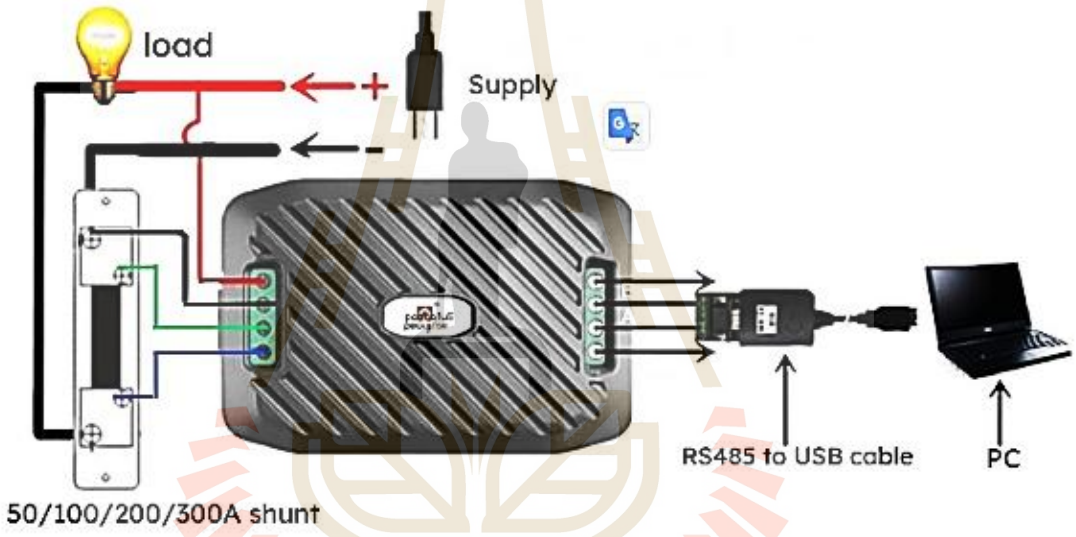
นอกจากนี้ การใช้ Google Sheets สำหรับจัดเก็บข้อมูลยังช่วยให้ระบบสามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลัง วิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงาน และติดตามค่าพารามิเตอร์ของเครื่องชาร์จผ่านระบบออนไลน์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกจะถูกจัดเก็บในรูปแบบ Time-series data ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องชาร์จในแต่ละโปรไฟล์ เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าระหว่างช่วง CC และ CV รวมถึงใช้สำหรับประเมินแนวโน้มของระบบชาร์จในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้แนวทางดังกล่าวช่วยให้ Supervisory layer ของระบบสามารถทำงานร่วมกับ Execution layer และ Monitoring layer ได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้โครงสร้างการสื่อสารเดียวกันของงานวิจัย

3.6.4 การติดตามและบันทึกข้อมูลพลังงานฝั่ง DC ของระบบชาร์จ

ระบบติดตามข้อมูลพลังงานฝั่งกระแสตรง (DC Side Measurement) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบพฤติกรรมของกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำในระดับ Output ของเครื่องชาร์จเดลต้า โดยการตรวจวัดพลังงานฝั่ง DC มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบฟิกส์ CC-CV เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการชาร์จในแต่ละช่วงของกระบวนการชาร์จ ทั้งนี้ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกใช้สำหรับตรวจสอบช่วงกระแสคงที่ (Constant Current: CC) และช่วงแรงดันคงที่ (Constant Voltage: CV) รวมถึงใช้สำหรับประเมิน

สมรรถนะของเครื่องชาร์จและความสอดคล้องของ Execution layer กับโปรไฟล์การชาร์จที่กำหนดไว้ภายในระบบ

ในการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC งานวิจัยนี้เลือกใช้ Power Meter รุ่น PZEM-017 ร่วมกับ Shunt resistor ขนาด 50A สำหรับติดตั้งบริเวณเอาต์พุตของเครื่องชาร์จเดลต้าระหว่างเครื่องชาร์จและแบตเตอรี่ โดย PZEM-017 สามารถตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสมของระบบได้โดยตรง ทั้งนี้หลักการทำงานของระบบตรวจวัดจะอาศัยการวัดแรงดันตกคร่อมบน Shunt resistor เพื่อนำไปคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบ ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะถูกตรวจวัดจากเอาต์พุตของเครื่องชาร์จโดยตรง ส่งผลให้ระบบสามารถติดตามพฤติกรรมของกระบวนการชาร์จในระดับ DC ได้อย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ด้วย PZEM-017 ร่วมกับ Shunt Resistor 50A

จากรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่า PZEM-017 ถูกติดตั้งอยู่บริเวณเอาต์พุตของเครื่องชาร์จเดลต้าเพื่อใช้สำหรับตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบชาร์จฝั่ง DC โดยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถสื่อสารข้อมูลผ่านโปรโตคอล Modbus RTU บนเครือข่าย RS485 ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่ Supervisory layer ของระบบ ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จาก PZEM-017 จะถูกใช้สำหรับติดตามพฤติกรรมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในช่วง CC และ CV รวมถึงใช้สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องชาร์จในแต่ละโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่

การอ่านค่าพลังงานจาก PZEM-017 งานวิจัยนี้กำหนดให้ Node-RED อ่านข้อมูลผ่านรีจิสเตอร์ของ Modbus RTU โดยข้อมูลที่ใช้ภายในระบบประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสะสม และสถานะแรงดันเกิน (High Voltage Alarm) ซึ่ง

ค่าพารามิเตอร์แต่ละชนิดจะถูกจัดเก็บอยู่ในรีจิสเตอร์ Address ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ข้อมูลแรงดันและกระแสจะถูกจัดเก็บในรูปแบบ 16-bit Register ขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจะถูกจัดเก็บในรูปแบบ 32-bit Register เพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบชาร์จ ดังแสดงในตารางที่ 3.6

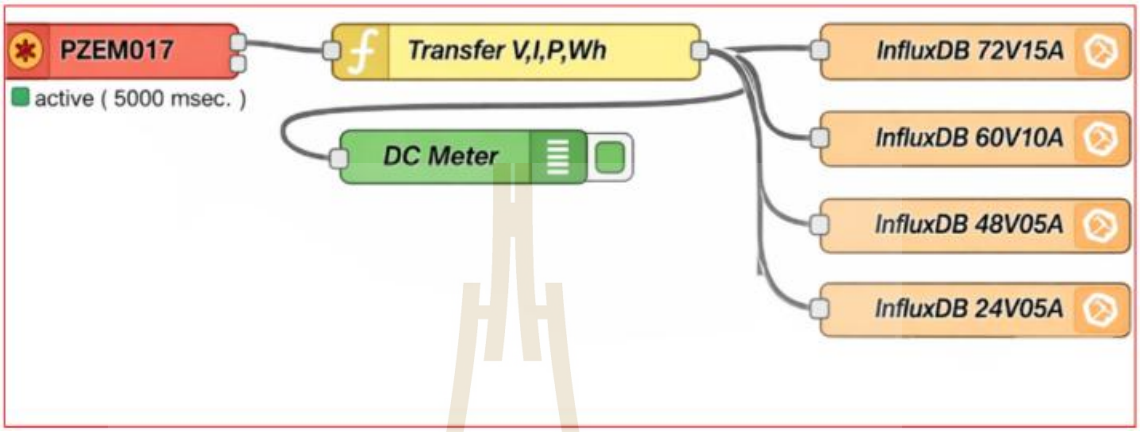
ตารางที่ 3.6 การแมปรีจิสเตอร์ Modbus RTU สำหรับตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ของ PZEM-017

พารามิเตอร์	**Address (Register)**	**จำนวนรีจิสเตอร์**	**หน่วย**	**Resolution**
แรงดันไฟฟ้า (Voltage, V)	0x0000	1 (16-bit)	V	1 LSB = 0.01 V
กระแสไฟฟ้า (Current, I)	0x0001	1 (16-bit)	A	1 LSB = 0.01 A
กำลังไฟฟ้า (Power, P)	0x0002 – 0x0003	2 (32-bit)	W	1 LSB = 0.1 W
พลังงานไฟฟ้า (Energy, kWh)	0x0004 – 0x0005	2 (32-bit)	kWh	1 LSB = 1 Wh
สถานะแรงดันเกิน (High Voltage Alarm)	0x0006	1	-	0xFFFF = Alarm

จากตารางที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบถูกจัดเก็บอยู่ที่รีจิสเตอร์ Address 0x0000 ขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าจะอยู่ที่ Address 0x0001 ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าจะถูกอ่านจาก Address 0x0002–0x0003 และค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมจะถูกจัดเก็บอยู่ที่ Address 0x0004–0x0005 ทั้งนี้ Node-RED จะทำหน้าที่อ่านค่าข้อมูลจากรีจิสเตอร์ดังกล่าวผ่าน Modbus RTU ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการประมวลผลภายใน Supervisory layer เพื่อใช้สำหรับติดตามพฤติกรรมของระบบชาร์จและจัดเก็บข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูลของระบบ

ภายใน Supervisory layer งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบบน Node-RED สำหรับอ่านและจัดเก็บข้อมูลพลังงานจาก PZEM-017 แบบ Real-time โดยระบบจะทำหน้าที่รับข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสมผ่าน Modbus RTU ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการจัดรูปแบบข้อมูลให้อยู่ในลักษณะ Time-series Data สำหรับใช้ในการจัดเก็บข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูล InfluxDB ทั้งนี้ข้อมูลจะถูกแยกจัดเก็บตามโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละ

ระบบ เช่น 24V5A, 48V5A, 60V5A และ 72V15A เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมของกระบวนการชาร์จในแต่ละโปรไฟล์ได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การจัดเก็บข้อมูลพลังงานฝั่ง DC จาก PZEM-017 ลงใน InfluxDB ผ่าน Node-RED

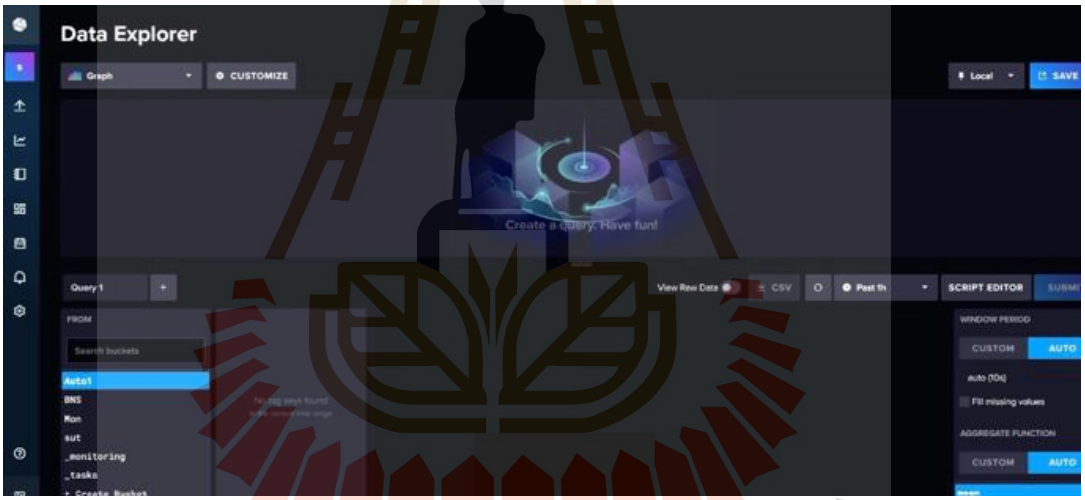
จากรูปที่ 3.20 จะเห็นได้ว่า Node-RED ถูกออกแบบให้สามารถรับข้อมูลจาก PZEM-017 ผ่าน Modbus RTU ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการ Transfer ข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บในฐานข้อมูล InfluxDB โดยข้อมูลที่ถูกจัดเก็บจะประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสมของระบบชาร์จ ทั้งนี้การจัดเก็บข้อมูลในลักษณะ Time-series Data ช่วยให้สามารถติดตามพฤติกรรมของระบบฟิกส์ CC-CV วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสระหว่างกระบวนการชาร์จ รวมถึงใช้สำหรับประเมินสมรรถนะของเครื่องชาร์จในแต่ละโปรไฟล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การใช้ InfluxDB ยังช่วยให้ระบบสามารถเชื่อมโยงข้อมูลเข้าสู่ Grafana สำหรับแสดงผลข้อมูลแบบ Real-time และใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังของระบบชาร์จในขั้นตอนถัดไปของงานวิจัยได้อย่างต่อเนื่อง

3.6.5 การแสดงผลและวิเคราะห์ข้อมูลผ่าน Grafana Dashboard

ระบบแสดงผลและวิเคราะห์ข้อมูลถูกพัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์ม Grafana เพื่อใช้เป็น Visualization layer สำหรับติดตามสถานะของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำแบบ Real-time โดย Grafana ถูกใช้ร่วมกับฐานข้อมูล InfluxDB ซึ่งทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ Time-series data จากระบบตรวจวัดพลังงานทั้งฝั่ง AC และ DC ภายในระบบชาร์จ ทั้งนี้ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บจะประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และข้อมูล CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามพฤติกรรมของระบบฟิกส์ CC-CV และวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องชาร์จได้อย่างต่อเนื่อง

ในการพัฒนาระบบแสดงผล งานวิจัยนี้กำหนดให้ Grafana เชื่อมต่อกับฐานข้อมูล InfluxDB ผ่าน Data Source เพื่อใช้สำหรับดึงข้อมูลจาก Supervisory layer มาแสดงผลในรูปแบบ Dashboard โดยระบบสามารถแสดงผลข้อมูลได้ทั้งในรูปแบบ Time-series Graph, Gauge และ Table ส่งผลให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าระหว่างกระบวนการชาร์จได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ข้อมูลทั้งหมดถูกแยกตามโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ เช่น 24V5A, 48V5A, 60V5A และ 72V15A เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบชาร์จในแต่ละเงื่อนไขได้อย่างชัดเจน

โครงสร้างของระบบฐานข้อมูลสำหรับใช้ร่วมกับ Grafana แสดงดังรูปที่ 3.21 โดยภายในงานวิจัยนี้เลือกใช้ InfluxDB เป็นฐานข้อมูลหลักสำหรับจัดเก็บข้อมูล Time-series จากระบบชาร์จ ทั้งนี้ข้อมูลจาก Node-RED จะถูกส่งเข้าสู่ InfluxDB ผ่าน MQTT และ Modbus RTU ก่อนถูกจัดเก็บในรูปแบบ Measurement เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของระบบชาร์จในระยะยาว

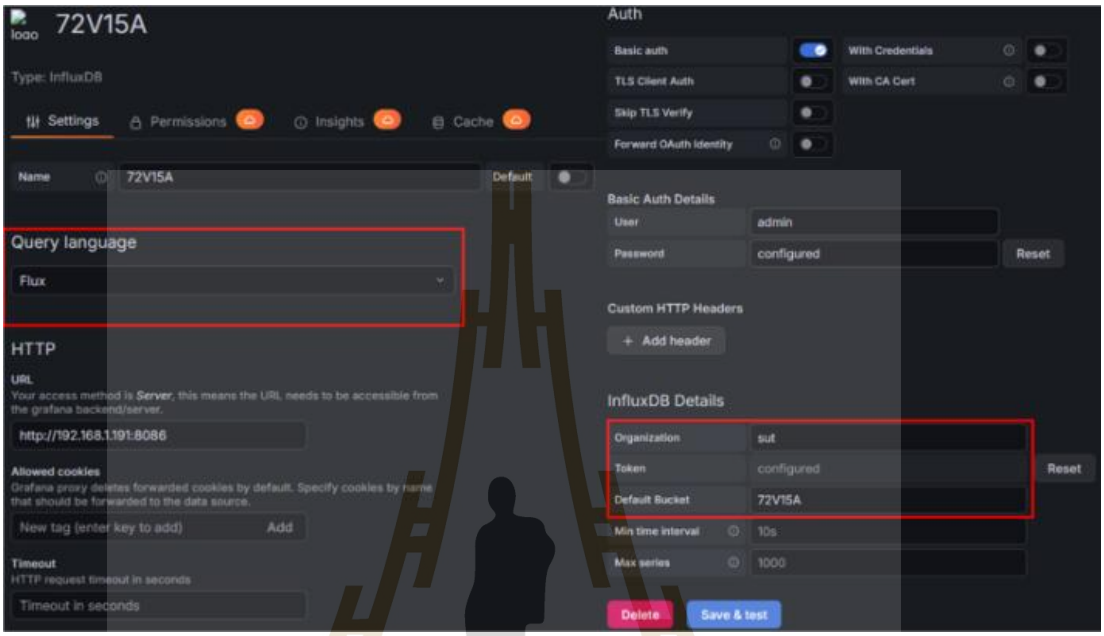


รูปที่ 3.21 ระบบฐานข้อมูล InfluxDB สำหรับจัดเก็บข้อมูลแบบ Time-series ของระบบชาร์จ

จากรูปที่ 3.21 จะเห็นได้ว่า InfluxDB ถูกใช้เป็นศูนย์กลางสำหรับจัดเก็บข้อมูลจากระบบชาร์จแบตเตอรี่ โดยข้อมูลที่ถูกจัดเก็บจะประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และข้อมูล CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ทั้งนี้การจัดเก็บข้อมูลในลักษณะ time-series data ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบชาร์จย้อนหลัง ติดตามแนวโน้มของการใช้พลังงาน และตรวจสอบความต่อเนื่องของ execution layer ภายในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภายใน Grafana งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ InfluxDB ทำหน้าที่เป็น Data Source สำหรับเชื่อมโยงข้อมูลจากฐานข้อมูลเข้าสู่ Dashboard โดยระบบจะทำการดึงข้อมูลจาก Measurement ของแต่ละโปรไฟล์การชาร์จมาใช้สำหรับสร้างกราฟและเครื่องมือแสดงผลแบบ

Real-time ทั้งนี้ การกำหนด Data Source ของ Grafana ช่วยให้ระบบสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจาก Supervisory layer เข้ากับ Visualization layer ได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การกำหนด Data Source ของ Grafana สำหรับเชื่อมต่อฐานข้อมูล InfluxDB

Grafana ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็น Visualization layer สำหรับแสดงผลข้อมูลของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำแบบ Real-time โดยระบบจะเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล InfluxDB ผ่าน Flux Query Language เพื่อใช้สำหรับดึงข้อมูล Time-series จาก Supervisory layer มาแสดงผลบน Dashboard ทั้งนี้ข้อมูลจากแต่ละโปรไฟล์การชาร์จจะถูกจัดเก็บแยกตาม Bucket ของ InfluxDB เช่น 24V5A, 48V5A, 60V5A และ 72V15A ส่งผลให้ระบบสามารถติดตามพฤติกรรมของการใช้พลังงานในแต่ละเงื่อนไขได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ Grafana ยังสามารถดึงข้อมูลด้านแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสมมาแสดงผลในรูปแบบ Time-series Data ได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถติดตามสถานะของระบบชาร์จได้แบบ Real-time ภายใต้ Supervisory system

นอกจากนี้ Grafana Dashboard ยังถูกใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบฟิกส์ CC-CV ภายในกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ โดยในช่วง Constant Current (CC) ระบบจะสามารถสังเกตเห็นค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาของการชาร์จ ส่วนในช่วง Constant Voltage (CV) ค่าแรงดันไฟฟ้าจะคงที่และกระแสไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงตามลักษณะของการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ทั้งนี้ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บภายใน InfluxDB และแสดงผล

ผ่าน Grafana ยังช่วยให้สามารถตรวจสอบความต่อเนื่องของ Execution layer วิเคราะห์แนวโน้มของการใช้พลังงาน และใช้สำหรับประเมินสมรรถนะของระบบชาร์จในแต่ละโปรไฟล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการแสดงกราฟและการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบชาร์จจะถูกนำเสนอเพิ่มเติมในบทถัดไป

3.7 สรุป

บทนี้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำที่ใช้สถาปัตยกรรมการสื่อสารและควบคุมแบบบูรณาการ ตั้งแต่การระบุโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen การส่งข้อมูลด้วย MQTT การประมวลผลและควบคุมผ่าน Node-RED และ Mini PLC-H3 (redPLC) ตลอดจนการเลือกวงจรฟิกส์ CC-CV ผ่าน Relay RS485 ด้วยโปรโตคอล Modbus RTU นอกจากนี้ยังครอบคลุมการตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลพลังงานทั้งฝั่ง AC และ DC ผ่าน PM2200 และ PZEM-017 รวมถึงการจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูล InfluxDB และการแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard เพื่อใช้ในการติดตาม วิเคราะห์ และประเมินพฤติกรรมของระบบชาร์จแบบ Real-time โครงสร้างที่พัฒนาขึ้นช่วยให้ระบบสามารถรองรับแบตเตอรี่หลายโปรไฟล์ภายในตู้ชาร์จเดียวกันได้อย่างเป็นลำดับ มีความต่อเนื่องในการทำงาน และสามารถเชื่อมโยง Communication layer, Execution layer และ Visualization layer เข้าด้วยกันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองและประเมินสมรรถนะของระบบในบทถัดไป ทั้งนี้ตัวอย่างโปรแกรมและซอร์สโค้ดที่ใช้สำหรับการสื่อสาร CANopen การประมวลผลบน Node-RED และการควบคุมอุปกรณ์ภายในระบบ จะถูกนำเสนอเพิ่มเติมในภาคผนวก ข ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำที่พัฒนาขึ้นจากสถาปัตยกรรมการสื่อสารและควบคุมในบทที่ 3 โดยมุ่งเน้นการประเมินความถูกต้องของกระบวนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen ความต่อเนื่องของการสื่อสารข้อมูลผ่าน MQTT และความเสถียรของ Execution layer ที่ใช้ควบคุมวงจรฟิกส์ CC-CV ผ่าน Modbus RTU และ RS485 Interface การทดลองถูกออกแบบให้สามารถรองรับแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดันภายในระบบเดียว ได้แก่ 24V5A, 48V5A, 60V5A และ 72V15A เพื่อใช้ตรวจสอบความสามารถของระบบในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างสอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละประเภท รวมถึงประเมินการทำงานร่วมกันของ Communication layer, Supervisory layer และ Monitoring layer ภายใต้สภาวะการทำงานจริงของระบบชาร์จ

นอกจากนี้ ยังทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการชาร์จผ่านการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้งฝั่ง AC และ DC ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า โดยข้อมูลจากระบบตรวจวัดถูกส่งเข้าสู่ Node-RED เพื่อประมวลผล จัดเก็บ และแสดงผลผ่านฐานข้อมูล InfluxDB และ Grafana Dashboard สำหรับใช้ติดตามสถานะของระบบแบบ Real-time ทั้งนี้ผลการทดลองที่นำเสนอในบทนี้จะครอบคลุมตั้งแต่การตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ การสื่อสารข้อมูลระหว่างแบตเตอรี่และตู้ชาร์จ การควบคุมรีเลย์ผ่าน Modbus RTU ตลอดจนการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ CC-CV และสมรรถนะของระบบชาร์จภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบที่พัฒนาขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2 การตั้งค่าการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ

การตั้งค่าการทดลองถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับทดสอบการทำงานของระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำภายใต้สภาวะการทำงานจริง โดยระบบประกอบด้วยตู้ควบคุมหลัก เครื่องชาร์จแบบโปรแกรมได้ ชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ระบบสื่อสาร CANopen ระบบควบคุมผ่าน Node-RED และระบบตรวจวัดพลังงานทั้งฝั่ง AC และ DC เพื่อใช้สำหรับติดตามและวิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV ทั้งนี้โครงสร้างของระบบถูกออกแบบให้สามารถรองรับแบตเตอรี่หลายโปรไฟล์ภายในตู้ชาร์จเดียวกัน ผ่านกระบวนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จด้วย CAN ID และการควบคุมวงจรฟิกส์ CC-CV ผ่าน Modbus RTU บนเครือข่าย RS485

ระบบควบคุมหลักใช้ Mini PLC-H3 (redPLC) เป็น Execution layer สำหรับรับคำสั่งจาก Node-RED และควบคุม Relay RS485 เพื่อเลือกค่าความต้านทานของวงจร CC-CV ที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าตามโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ ขณะที่ ESP32 และ CAN Transceiver ทำหน้าที่เป็น Communication layer สำหรับรับและส่งข้อมูล CANopen ระหว่างแบตเตอรี่และตู้ชาร์จ โดยเมื่อมีการเชื่อมต่อสายชาร์จ ระบบจะทำการส่ง CAN ID ของแบตเตอรี่เข้าสู่ Supervisory layer เพื่อใช้ในการระบุโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสม จากนั้น Node-RED จะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล ส่งคำสั่งควบคุมผ่าน MQTT และจัดเก็บข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูลของระบบ

ในส่วนของการตรวจวัดพลังงาน ระบบใช้ PM2200 สำหรับตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ของเครื่องชาร์จ และใช้ PZEM-017 ร่วมกับ Shunt resistor สำหรับตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ระหว่างเครื่องชาร์จและแบตเตอรี่ โดยข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าสู่ Node-RED ผ่าน Modbus RTU ก่อนจัดเก็บใน InfluxDB และแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard สำหรับใช้ติดตามพฤติกรรมของระบบแบบ real-time รวมถึงใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการชาร์จในแต่ละโปรไฟล์ของแบตเตอรี่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.1 การตั้งค่าการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าระบบการทดลองประกอบด้วยชุดควบคุมฮาร์ดแวร์ ตู้ชาร์จหลัก ระบบสื่อสาร CANopen และระบบแสดงผลข้อมูลผ่าน Grafana Dashboard โดยแบตเตอรี่ NMC แต่ละชุดจะทำการส่ง CAN ID เพื่อระบุโปรไฟล์การชาร์จเข้าสู่ระบบควบคุม ก่อนที่ Node-RED และ redPLC จะทำหน้าที่ประมวลผลและเลือกค่าการชาร์จผ่านวงจรฟิกส์ CC-CV ให้สอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน ทั้งนี้ข้อมูลด้านพลังงานและสถานะการทำงานของระบบจะถูกติดตามและแสดงผลแบบ Real-time ผ่าน Supervisory layer ของระบบชาร์จ

4.3 การตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen

การทดลองในส่วนนี้ถูกดำเนินการเพื่อประเมินความถูกต้องของกระบวนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่านระบบสื่อสาร CANopen โดยแบตเตอรี่แต่ละชุดจะทำการส่ง CAN ID เพื่อใช้ระบุโปรไฟล์การชาร์จเข้าสู่ตู้ชาร์จผ่าน ESP32 และ CAN Transceiver จากนั้นระบบจะทำการประมวลผล CAN ID ภายใน Node-RED ก่อนส่งคำสั่งผ่าน MQTT และ Modbus RTU ไปยัง Execution layer สำหรับเลือกวงจรฟิกส์ CC-CV ที่สอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน ทั้งนี้การทดลองถูกออกแบบให้ครอบคลุมโปรไฟล์การชาร์จจำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ 24V5A, 48V5A, 60V5A และ 72V15A เพื่อใช้ตรวจสอบความสามารถของระบบในการเลือกค่าพารามิเตอร์การชาร์จได้อย่างถูกต้อง

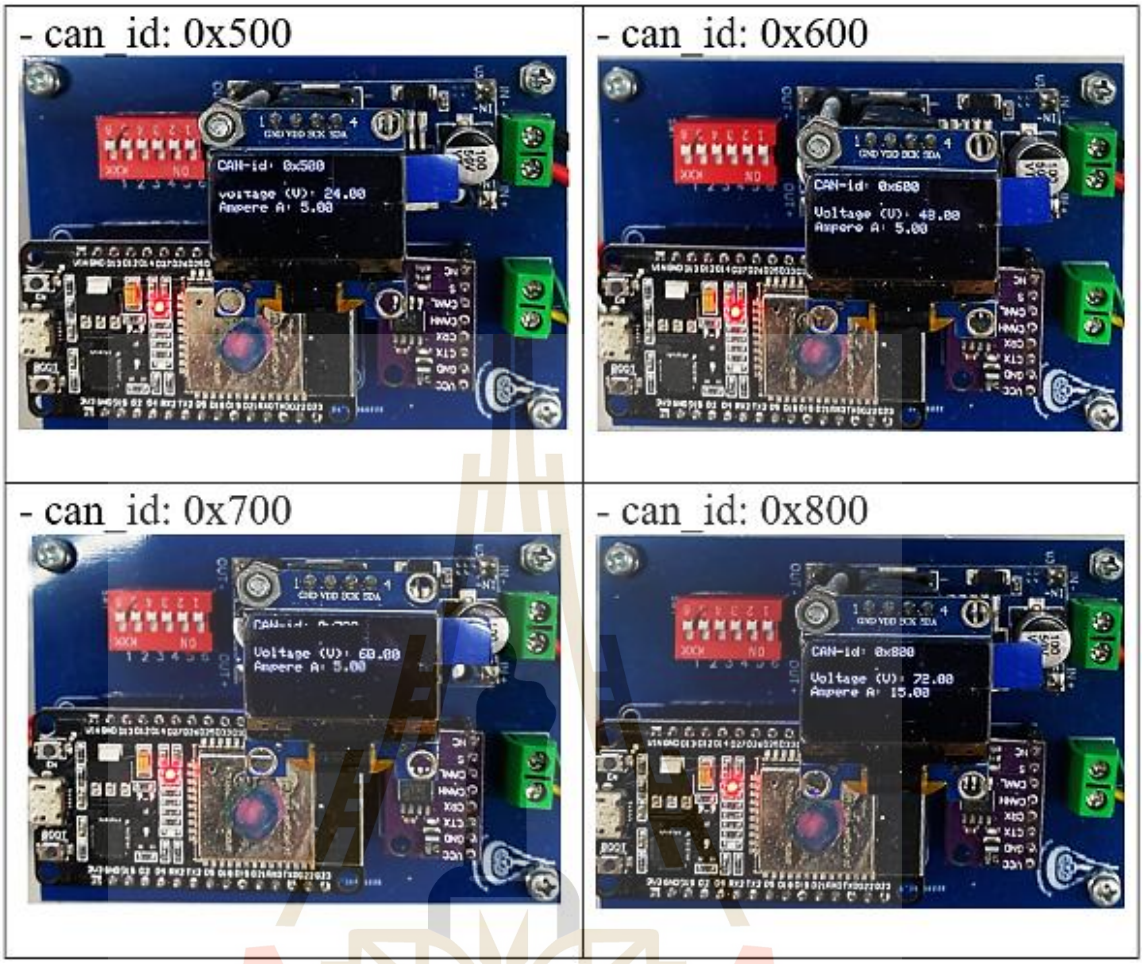
ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการเลือกโปรไฟล์การชาร์จจากค่า CAN ID แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้ตรงกับค่าที่กำหนดไว้ในทุกกรณี โดยไม่พบความผิดพลาดในการแมปค่า CAN ID กับโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่ ทั้งนี้ผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรของ Communication layer และความสามารถของ Supervisory layer ในการประมวลผลข้อมูลโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จจากค่า CAN ID

CAN ID	แรงดัน (V)	กระแส (A)	โปรไฟล์ที่เลือก	ผลการทดสอบ
0x500	24	5	24V 5A CC–CV	True
0x600	48	5	48V 5A CC–CV	True
0x700	60	5	60V 5A CC–CV	True
0x800	72	15	72V 15A CC–CV	True

จากตารางที่ 4.1 พบว่าระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้ถูกต้องครบทั้ง 4 โปรไฟล์ โดยค่าพารามิเตอร์แรงดันและกระแสของแบตเตอรี่แต่ละระบบถูกแมปเข้ากับโปรไฟล์ CC-CV ได้อย่างสอดคล้อง ส่งผลให้ Execution layer สามารถกำหนดค่าการชาร์จของเครื่องชาร์จเดลต้าได้อย่างถูกต้องตามเงื่อนไขที่กำหนด ทั้งนี้ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสื่อสาร CANopen และกระบวนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างต่อเนื่องและมีความน่าเชื่อถือสำหรับการใช้งานในระบบชาร์จแบตเตอรี่หลายโปรไฟล์ภายในตู้ชาร์จเดียวกัน

นอกจากนี้ ยังทำการตรวจสอบข้อมูลโปรไฟล์การชาร์จผ่านจอ OLED ของ ESP32 เพื่อใช้ยืนยันความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ก่อนเข้าสู่ Execution layer โดยผลการทดลองพบว่า ESP32 สามารถแสดงข้อมูล CAN ID ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าของแต่ละโปรไฟล์ได้ตรงตามค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการส่งต่อไปยัง Node-RED และระบบควบคุมรีเลย์ผ่าน Modbus RTU เพื่อเลือกวงจรฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จต่อไป



รูปที่ 4.2 ผลการตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าแต่ละ CAN ID สามารถระบุโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่ได้อย่างชัดเจน โดย CAN ID 0x500 ถูกกำหนดให้ใช้โปรไฟล์ 24V 5A ขณะที่ CAN ID 0x600, 0x700 และ 0x800 ถูกใช้สำหรับโปรไฟล์ 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวถูกแสดงผ่านจอ OLED ของ ESP32 เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนเข้าสู่ Execution layer ของระบบชาร์จ ส่งผลให้สามารถลดความผิดพลาดในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จและเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการควบคุมภายในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

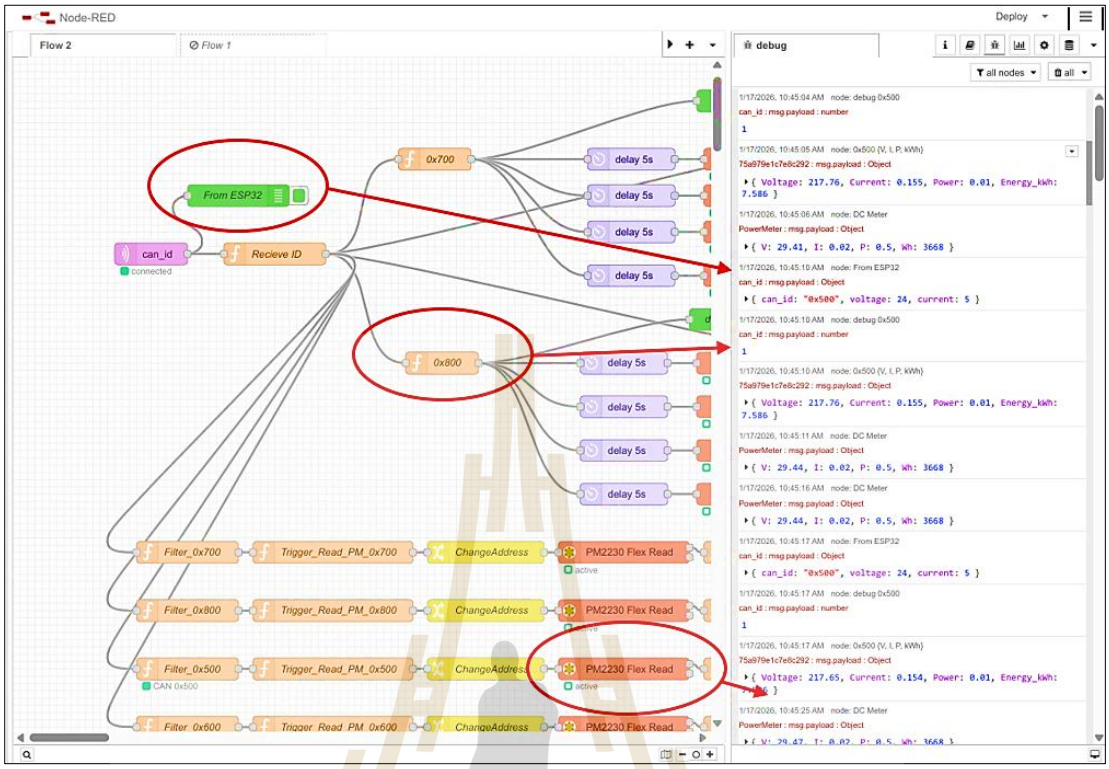
4.4 การส่งข้อมูล CAN ID ไปยัง Node-RED และการควบคุมโปรไฟล์การชาร์จผ่าน MQTT

ผลการทดลองในส่วนนี้ใช้สำหรับประเมินความสามารถของระบบในการรับและส่งข้อมูล CAN ID ระหว่างแบตเตอรี่และระบบควบคุมผ่านโปรโตคอล MQTT รวมถึงตรวจสอบความต่อเนื่อง

ของกระบวนการประมวลผลภายใน Supervisory layer สำหรับเลือกโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ โดยเมื่อมีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้าสู่ระบบ ESP32 จะทำหน้าที่ส่งข้อมูล CAN ID ที่ได้จากการแมปโปรไฟล์แบตเตอรี่เข้าสู่ MQTT Broker ก่อนที่ Node-RED จะทำการ Subscribe ข้อมูลจาก Topic ที่กำหนดไว้และนำเข้าสู่กระบวนการประมวลผลเพื่อเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่สอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละชุด ทั้งนี้ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถรับและส่งข้อมูล CAN ID ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่พบการสูญหายของข้อมูลระหว่าง Communication layer และ Supervisory layer ภายหลังจาก Node-RED ได้รับข้อมูล CAN ID ระบบจะเข้าสู่กระบวนการ Filtering และ Routing ภายใน flow ของ Node-RED เพื่อแยกเส้นทางข้อมูลของแบตเตอรี่แต่ละโปรไฟล์ออกจากกัน โดยผลการทดลองพบว่า Node-RED สามารถตรวจสอบและคัดแยกค่า CAN ID ได้อย่างถูกต้องสำหรับทุกโปรไฟล์การชาร์จ ได้แก่ 0x500, 0x600, 0x700 และ 0x800 ก่อนส่งคำสั่งควบคุมผ่าน Modbus RTU ไปยัง execution layer สำหรับ Trigger Relay RS485 เพื่อเลือกวงจรฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้าให้สอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ Modbus RTU บนเครือข่าย RS485 ช่วยให้การส่งคำสั่งควบคุมมีความเสถียรและสามารถตอบสนองต่อการเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการทำงานจริงของระบบ

โครงสร้างการทำงานของ Node-RED สำหรับการรับข้อมูล CAN ID การแยกโปรไฟล์การชาร์จ และการ Trigger execution layer แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยภายใน Flow ของ Node-RED ระบบจะเริ่มต้นจากการรับข้อมูล CAN ID ผ่าน MQTT จาก ESP32 ก่อนเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบค่า CAN ID และแยกเส้นทางข้อมูลตามโปรไฟล์ของแบตเตอรี่แต่ละระบบ จากนั้นระบบจะทำการส่งคำสั่งควบคุมรีเลย์ผ่าน Modbus RTU และแสดงผลข้อมูลผ่าน Debug panel เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบแบบ Real-time

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.3 การส่งข้อมูล CAN ID จาก ESP32 ไปยัง Node-RED ผ่านโปรโตคอล MQTT

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า Node-RED สามารถรับข้อมูล CAN ID จาก ESP32 ผ่าน MQTT ได้อย่างต่อเนื่อง โดยบริเวณด้านซ้ายของ Flow เป็นส่วนรับข้อมูลจาก MQTT Broker ขณะที่บริเวณกึ่งกลางของระบบเป็นส่วน filtering สำหรับตรวจสอบและแยกเส้นทางข้อมูลตามค่า CAN ID ของแบตเตอรี่แต่ละโปรไฟล์ ทั้งนี้เมื่อระบบตรวจพบค่า CAN ID ที่ตรงตามเงื่อนไข ระบบจะทำการ Trigger Execution layer เพื่อส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยัง Relay RS485 สำหรับเลือกวงจรฟิกส์ CC-CV ของเครื่องชาร์จเดลต้าให้ตรงกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน นอกจากนี้บริเวณ Debug panel ทางด้านขวายังแสดงผลข้อมูล CAN ID ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้รับจาก ESP32 แบบ Real-time เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลระหว่างกระบวนการสื่อสารและควบคุมภายในระบบ นอกจากนี้ ภายใน Flow ของ Node-RED ยังพบว่าระบบสามารถ Trigger การอ่านข้อมูลจาก PM2200 ได้สอดคล้องกับโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ โดย Node-RED จะทำการเลือกเส้นทางการอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าตาม CAN ID ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่กระบวนการ Monitoring และ Data logging ของระบบชาร์จต่อไป ผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบ Supervisory layer สามารถทำงานร่วมกับ Communication layer และ Execution layer ได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ควบคุมเครื่องชาร์จ และติดตามข้อมูลของระบบได้ภายใต้โครงสร้างการสื่อสารเดียวกันอย่างมีเสถียรภาพ

4.5 การเก็บข้อมูลและการแสดงผลของระบบ

หัวข้อนี้นำเสนอผลการตรวจวัด การจัดเก็บ และการแสดงผลข้อมูลพลังงานของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ ทั้งฝั่งกระแสสลับ (AC) และกระแสตรง (DC) เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV และประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้เงื่อนไขการทำงานจริง โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้จาก PM2200 และ PZEM-017 จะถูกส่งเข้าสู่ Node-RED ผ่าน Modbus RTU ก่อนนำไปจัดเก็บใน Google Sheets และฐานข้อมูล InfluxDB สำหรับใช้ในการติดตามสถานะของระบบ วิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลัง และแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard แบบ Real-time นอกจากนี้ยังครอบคลุมการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องชาร์จในแต่ละโปรไฟล์ของแบตเตอรี่ด้วย

4.5.1 การติดตามและวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC

การทดลองในส่วนนี้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าฝั่งขาเข้าของเครื่องชาร์จเดลต้าในระหว่างกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ โดยใช้ Power Meter รุ่น PM2200 สำหรับตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าฝั่ง AC ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสม ทั้งนี้ข้อมูลจากมิเตอร์จะถูกอ่านค่าผ่านโปรโตคอล Modbus RTU และส่งเข้าสู่ Node-RED เพื่อใช้สำหรับประมวลผล จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูลในรูปแบบ time-series data สำหรับติดตามพฤติกรรมของระบบชาร์จภายใต้สภาวะการทำงานจริง

ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก PM2200 ถูกจัดเก็บลงใน Google Sheets ทุก ๆ 1 นาที เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังและวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องชาร์จในแต่ละช่วงเวลา โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกประกอบด้วยเวลา ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสะสม ประเภทช่วงเวลา TOU (Time of Use) อัตราค่าไฟฟ้า และค่าคำนวณต้นทุนด้านพลังงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทั้งนี้การจัดเก็บข้อมูลในลักษณะดังกล่าวช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มของการใช้พลังงาน ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าฝั่งขาเข้า และใช้สำหรับประเมินต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องชาร์จในแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	TimeStamp	Voltage [V]	Current [A]	Power [kW]	Energy [kWh]	TOU Type	Rate [THB]	Cost [THB]
674	2026-01-19 19:00:28	0	0	0	8.206	Idle	0	0
675	2026-01-19 19:01:31	212.72	5.233	0.94	8.211	On-peak	5.1135	0
676	2026-01-19 19:02:01	212.7	5.228	0.94	8.219	On-peak	5.1135	0
677	2026-01-19 19:02:36	212.89	5.234	0.94	8.228	On-peak	5.1135	0
678	2026-01-19 19:03:10	212.62	5.252	0.95	8.237	On-peak	5.1135	0
679	2026-01-19 19:04:03	212.73	5.267	0.95	8.25	On-peak	5.1135	0
680	2026-01-19 19:04:36	212.61	5.280	0.95	8.259	On-peak	5.1135	0
681	2026-01-19 19:05:17	212.6	5.295	0.96	8.27	On-peak	5.1135	0
682	2026-01-19 19:05:50	212.41	5.306	0.96	8.279	On-peak	5.1135	0
683	2026-01-19 19:06:56	212.48	5.326	0.96	8.297	On-peak	5.1135	0
684	2026-01-19 19:07:35	212.56	5.334	0.96	8.307	On-peak	5.1135	0
685	2026-01-19 19:08:06	212.64	5.339	0.97	8.315	On-peak	5.1135	0
686	2026-01-19 19:09:01	213.23	4.770	0.86	8.329	On-peak	5.1135	0
687	2026-01-19 19:09:46	213.67	4.366	0.79	8.34	On-peak	5.1135	0
688	2026-01-19 19:10:41	214.24	4.008	0.72	8.351	On-peak	5.1135	0

รูปที่ 4.4 การจัดเก็บข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC จาก PM2200 ลงใน Google Sheets

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถบันทึกค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าฝั่ง AC ได้อย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลที่จัดเก็บประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสะสม รวมถึงประเภทช่วงเวลา TOU และอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้งานจริง ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของระบบชาร์จผ่านโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1.3 แบบ TOU เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการใช้พลังงานระหว่างช่วงเวลา On-Peak และ Off-Peak ของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของช่วงเวลาการชาร์จต่อ Operational cost ของระบบได้อย่างชัดเจน

ผลการแสดงข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC แบบ real-time ผ่าน Grafana Dashboard แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยระบบสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญของเครื่องชาร์จ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสมในลักษณะ Time-series graph ซึ่งข้อมูลทั้งหมดถูกดึงมาจากฐานข้อมูล InfluxDB ผ่าน Flux Query Language ก่อนนำมาแสดงผลบน dashboard ของระบบ Supervisory layer สำหรับใช้ติดตามพฤติกรรมของระบบชาร์จระหว่างการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.5 การแสดงผลข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ผ่าน Grafana Dashboard ของระบบ 72V 15A

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าฝั่ง AC มีลักษณะค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 220 V ตลอดการทดลอง ขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะของกระบวนการชาร์จ นอกจากนี้ค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาของการทำงาน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการติดตามและจัดเก็บข้อมูลพลังงานแบบ Real-time ได้อย่างมีเสถียรภาพ รวมถึงสามารถใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบชาร์จประเมินเสถียรภาพของ Execution layer และตรวจสอบความต่อเนื่องของกระบวนการชาร์จในแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในช่วงเวลา On-Peak แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าสูงตามโครงสร้าง TOU ของการไฟฟ้า ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ต้นทุนการใช้พลังงานของระบบชาร์จภายใต้ช่วงเวลาที่มีภาระโหลดสูงของระบบไฟฟ้า รวมถึงใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของต้นทุนด้านพลังงานระหว่างโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่แต่ละระบบ

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วง On-Peak ในแต่ละรอบชาร์จ

แบตเตอรี่	กระแสชาร์จ	ชั่วโมง	TOU: On Peak	Cost/การชาร์จ
24V25Ah	5A	5	5.1153 บาท (ยังไม่คิดค่าบริการ 312.24 บาทต่อเดือนเนื่องจากยังไม่ครบรอบเดือนเป็นการชาร์จต่อครั้งเท่านั้น)	3.07 บาท
48V25Ah	5A	5		6.14 บาท
60V25Ah	5A	5		7.67 บาท
72V25Ah	15A	1.67		9.20 บาท

*คิดต่อรอบการชาร์จในแต่ละครั้ง ยังไม่รวมค่าบริการในรอบเดือน

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของระบบชาร์จมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาของการชาร์จ โดยเฉพาะในโปรไฟล์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนด้านพลังงานในช่วงเวลา On-Peak ที่มีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่าปกติ โดยผลต่างของค่าใช้จ่ายดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของช่วงเวลาการใช้งานต่อ Energy management และ Operational cost ของระบบชาร์จอย่างชัดเจน

ขณะที่ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในช่วงเวลา Off-Peak แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าต่ำกว่า On-Peak ส่งผลให้ต้นทุนการใช้พลังงานของระบบชาร์จลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความเหมาะสมของช่วงเวลาการชาร์จแบตเตอรี่เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วง Off-Peak ในแต่ละรอบชาร์จ

แบตเตอรี่	กระแสชาร์จ	ชั่วโมง	TOU: Off Peak	Cost/การชาร์จ
24V25Ah	5A	5	2.6037 บาท (ยังไม่คิดค่าบริการ 312.24 บาทต่อเดือนเนื่องจากยังไม่ครบรอบเดือนเป็นการชาร์จต่อครั้งเท่านั้น)	1.56 บาท
48V25Ah	5A	5		3.12 บาท
60V25Ah	5A	5		3.91 บาท
72V25Ah	15A	1.67		4.69 บาท

*คิดต่อรอบการชาร์จในแต่ละครั้ง ยังไม่รวมค่าบริการในรอบเดือน

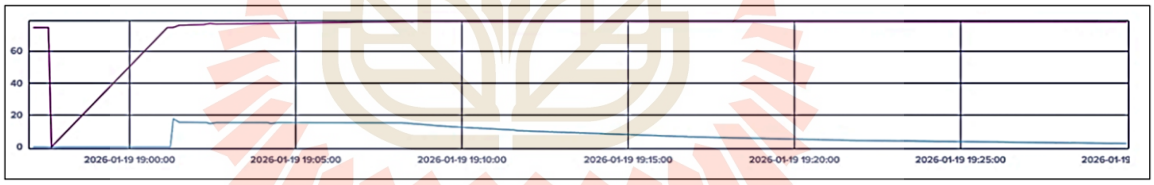
จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของระบบชาร์จในช่วง Off-Peak มีค่าต่ำกว่าช่วง On-Peak ในทุกโปรไฟล์การชาร์จ เนื่องจากอัตราค่าไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ส่งผลให้การชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงเวลาดังกล่าวมีความเหมาะสมในด้านต้นทุนพลังงานมากกว่า ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้

เห็นว่าการกำหนดช่วงเวลาการชาร์จมีผลโดยตรงต่อต้นทุนด้านพลังงานของระบบ โดยการชาร์จในช่วง Off-Peak สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับวางแผน Energy management ของระบบชาร์จแบตเตอรี่ในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5.2 การติดตามและวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC

การทดลองในส่วนนี้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของพลังงานไฟฟ้าฝั่งกระแสตรง (DC) ระหว่างเครื่องชาร์จและแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ ภายใต้กระบวนการชาร์จแบบ CC-CV โดยใช้ Power Meter รุ่น PZEM-017 ร่วมกับ Shunt resistor สำหรับตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสม ทั้งนี้ข้อมูลจากมิเตอร์จะถูกส่งผ่าน Modbus RTU เข้าสู่ Node-RED เพื่อใช้สำหรับประมวลผลและจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูล InfluxDB ในรูปแบบ Time-series data สำหรับติดตามพฤติกรรมของระบบชาร์จแบบ Real-time

โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ลงในฐานข้อมูล InfluxDB แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยข้อมูลจาก PZEM-017 จะถูกอ่านค่าผ่าน Node-RED ก่อนถูกจัดเก็บในลักษณะ Time-series ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการชาร์จได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้แนวทางดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของเครื่องชาร์จและแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงของกระบวนการ CC-CV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

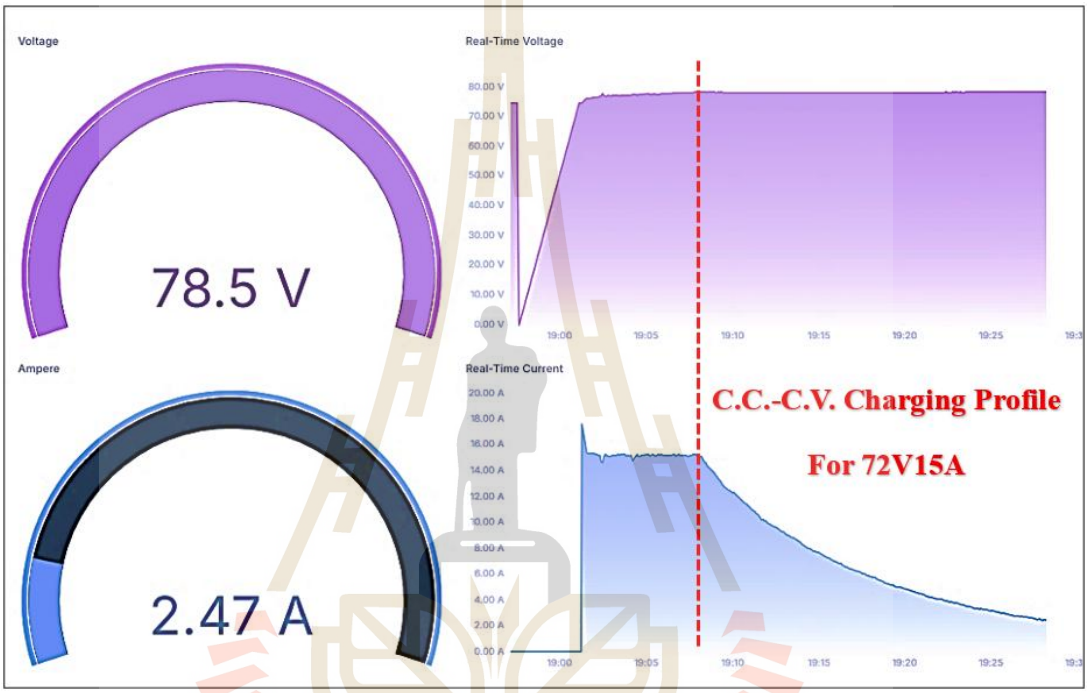


รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลแรงดันและกระแสในฐานข้อมูล InfluxDB จากมิเตอร์ฝั่ง DC

*ข้อมูลใน InfluxDB ไม่สามารถขยาย Scale ขนาดกราฟได้ ต้องใช้ Grafana เป็นตัวช่วยในการปรับกราฟให้เหมาะสม

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าฝั่ง DC ได้อย่างต่อเนื่องและมีลักษณะสอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริงของระบบชาร์จ โดยข้อมูลดังกล่าวถูกใช้สำหรับติดตามพฤติกรรมของแรงดันและกระแสตามช่วงเวลาของกระบวนการชาร์จ รวมถึงใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับวิเคราะห์ Transition behavior ระหว่างช่วง Constant Current (CC) และ Constant Voltage (CV) ของระบบชาร์จแบตเตอรี่

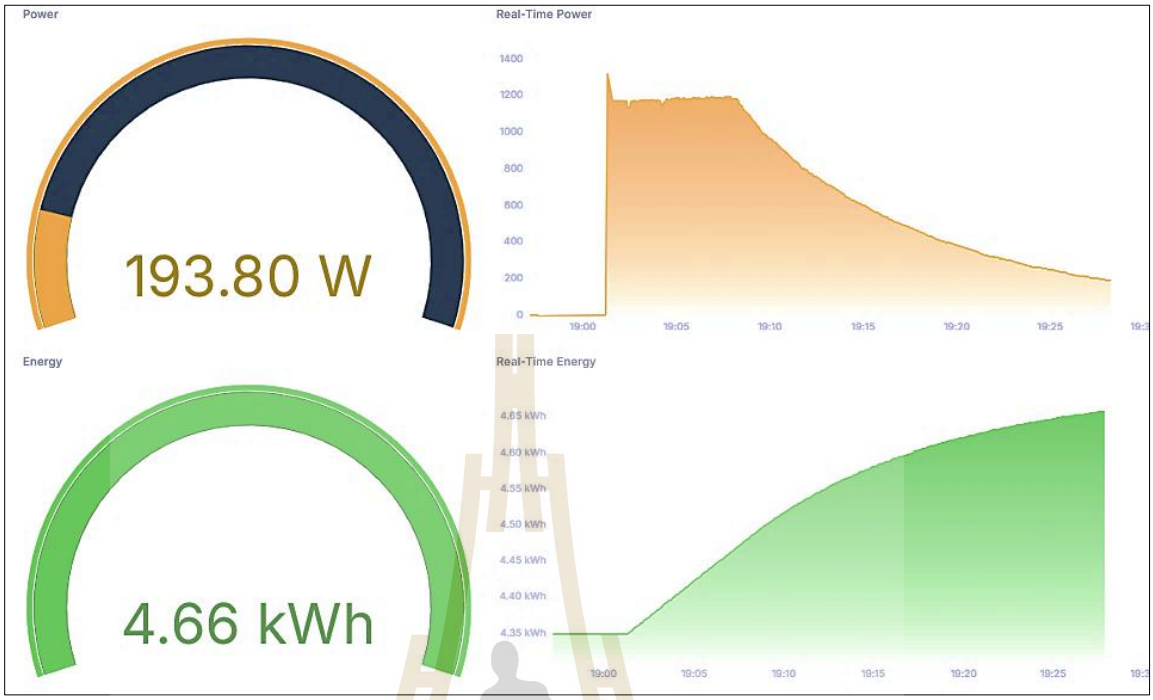
ผลการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 72V 15A แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยกราฟแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการชาร์จ ก่อนเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในช่วง CV ขณะที่กราฟกระแสไฟฟ้าในช่วงต้นของการชาร์จจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่ตามเงื่อนไขของช่วง CC ก่อนค่อย ๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วง CV ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบ CC-CV



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 72V15A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana

จากรูปที่ 4.7 พบว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่พบ overshoot หรือความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จ ทั้งนี้ช่วง Transition ระหว่าง CC และ CV มีลักษณะต่อเนื่องและสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบได้อย่างเสถียร ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของ execution layer และ supervisory layer ในการควบคุมเครื่องชาร์จภายใต้โปรไฟล์ 72V 15A

ผลการทดลองด้านกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าสะสมของโปรไฟล์ 72V 15A แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยกำลังไฟฟ้ามีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการชาร์จ ก่อนลดลงตามลักษณะของกระแสไฟฟ้าเมื่อเข้าสู่ช่วง CV ขณะที่พลังงานไฟฟ้าสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาของการชาร์จ



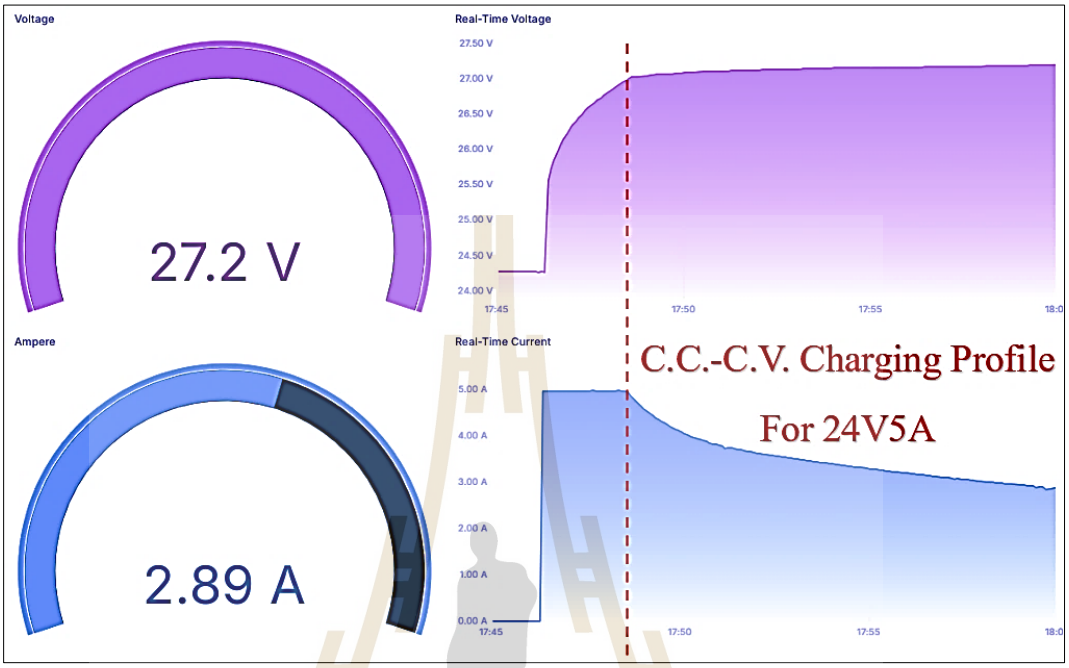
รูปที่ 4.8 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 72V 15A แสดงผ่าน Grafana

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าลักษณะของกราฟกำลังไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV โดยในช่วง CC ระบบมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูงเพื่อรองรับกระแสชาร์จคงที่ ก่อนที่กำลังไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงในช่วง CV ตามการลดลงของกระแสไฟฟ้า ขณะที่กราฟพลังงานไฟฟ้าสะสมมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการจ่ายพลังงานให้กับแบตเตอรี่ได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดกระบวนการชาร์จ

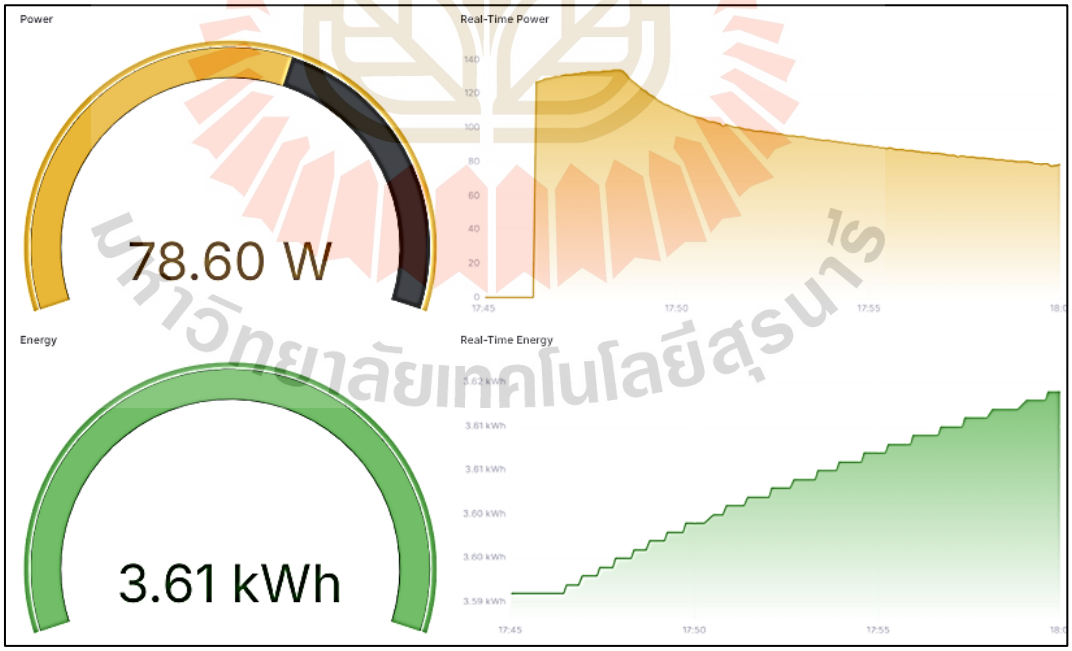
ผลการทดลองของโปรไฟล์ 24V 5A แสดงดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ขณะที่ผลการทดลองของโปรไฟล์ 48V 5A และ 60V 5A แสดงดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.14 ตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องในทุกโปรไฟล์การชาร์จ ทั้งนี้พฤติกรรมของกราฟแรงดันและกระแสยังคงมีลักษณะสอดคล้องกับการชาร์จแบบ CC-CV กล่าวคือแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ช่วงแรงดันคงที่ ขณะที่กระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะคงที่ในช่วง CC และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วง CV

นอกจากนี้ กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าสะสมของทุกโปรไฟล์ยังแสดงแนวโน้มสอดคล้องกับลักษณะการทำงานของระบบชาร์จ โดยกำลังไฟฟ้าจะลดลงตามกระแสไฟฟ้าในช่วง CV ขณะที่พลังงานไฟฟ้าสะสมจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการชาร์จ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถตอบสนองต่อโปรไฟล์แบตเตอรี่ที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ Supervisory system ที่พัฒนาขึ้น

- กรณีศึกษา 24V 5A พฤติกรรมการชาร์จ CC-CV

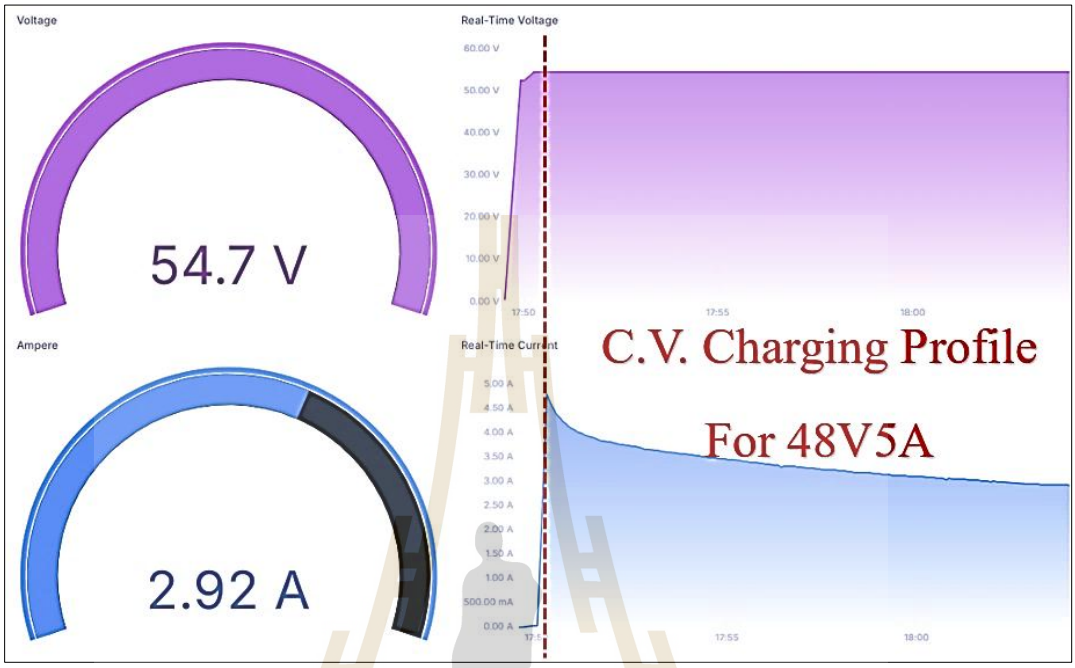


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 24V5A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana

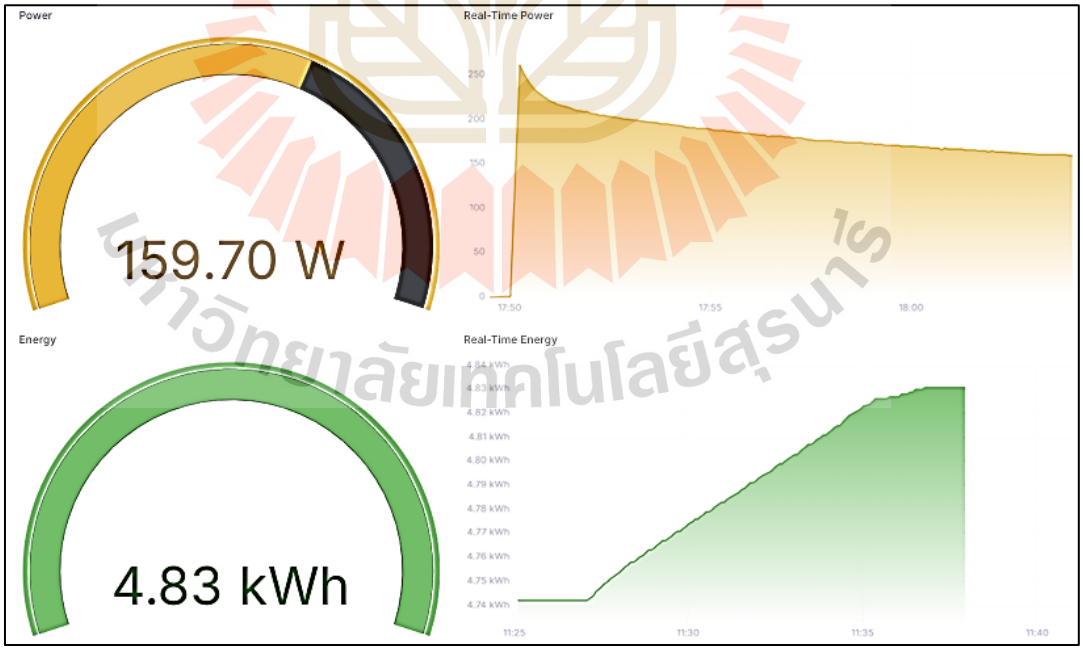


รูปที่ 4.10 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 24V5A แสดงผ่าน Grafana

- กรณีศึกษา 48V 5A พฤติกรรมการชาร์จ CC-CV

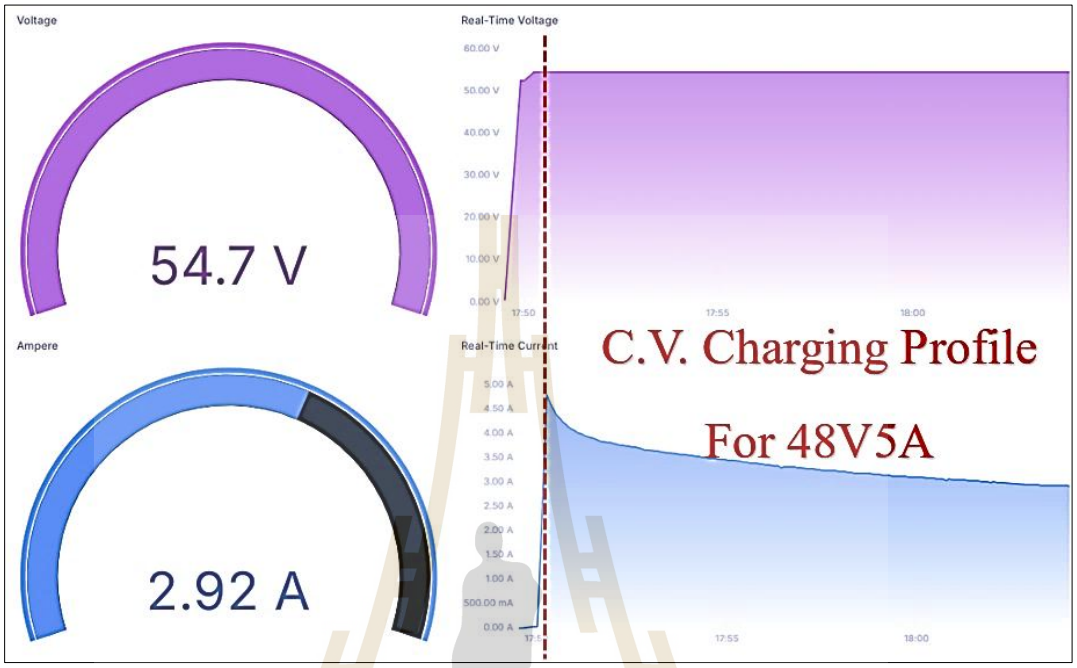


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 48V5A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana

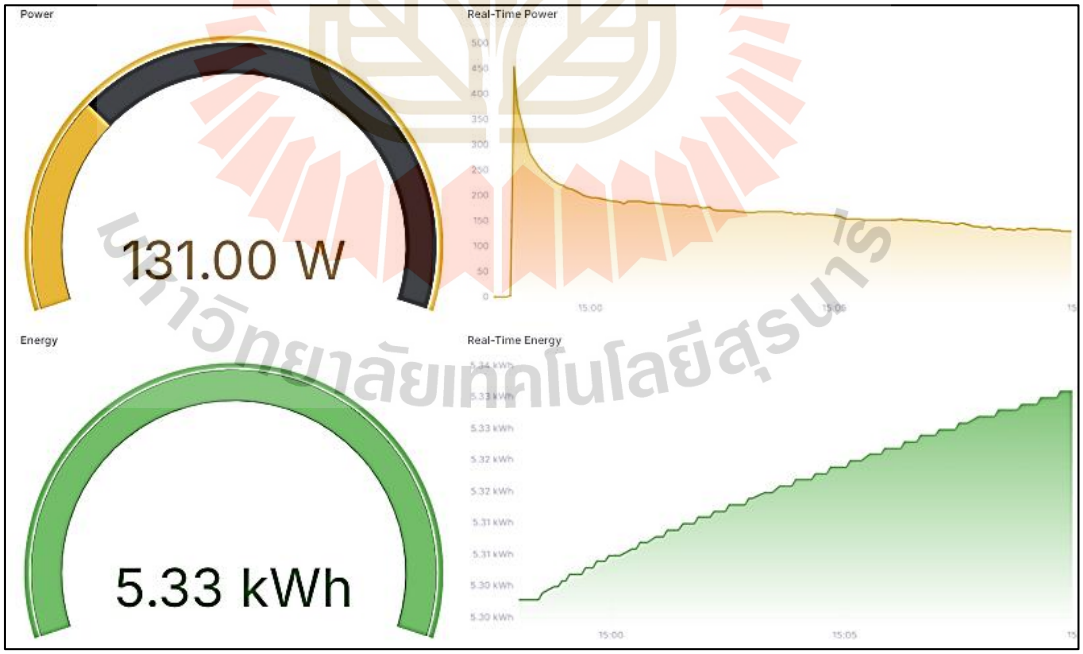


รูปที่ 4.12 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 48V5A แสดงผ่าน Grafana

- กรณีศึกษา 60V 5A พฤติกรรมการชาร์จ CC-CV



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 60V5A แสดงพฤติกรรม CC–CV ผ่าน Grafana

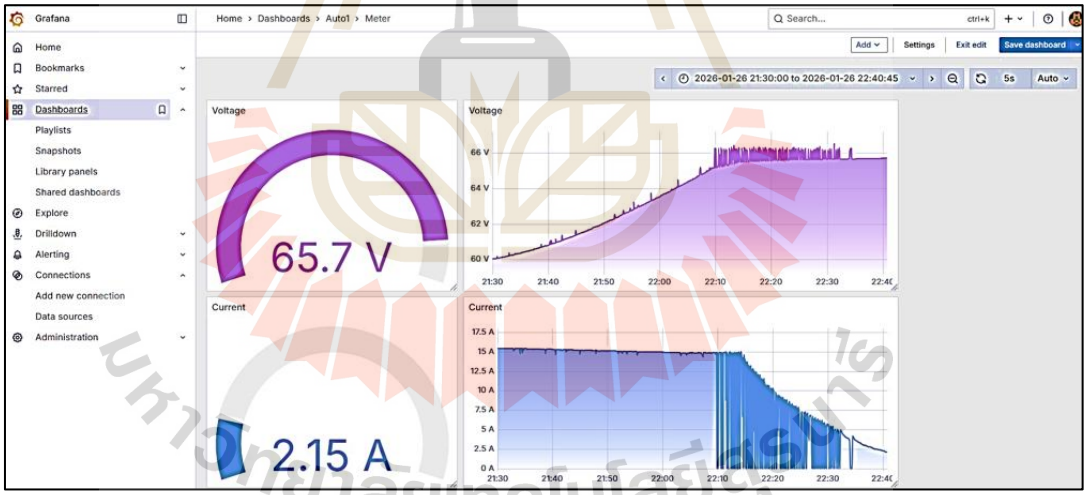


รูปที่ 4.14 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 60V5A แสดงผ่าน Grafana

4.5.3 ผลกระทบของความไม่สมดุลของเซลล์แบตเตอรี่ต่อพฤติกรรมการชาร์จ

จากผลการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ พบว่าในบางกรณีกระบวนการชาร์จไม่สามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่องตามลักษณะของการชาร์จแบบ CC-CV เนื่องจากเกิดความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ภายในแพ็ก ส่งผลให้ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ต้องทำการตัดและต่อการชาร์จเป็นระยะเพื่อป้องกันแรงดันเกินของเซลล์แบตเตอรี่ ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวพบได้ชัดเจนในโปรไฟล์การชาร์จ 60V 5A ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของ Cell imbalance ต่อเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จในช่วง Constant Voltage (CV)

ผลการทดลองของระบบชาร์จโปรไฟล์ 60V 5A แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยกราฟแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเพิ่มขึ้นตามกระบวนการชาร์จจนเข้าสู่ช่วงแรงดันคงที่ ขณะที่กราฟกระแสไฟฟ้าในช่วงต้นของการชาร์จมีลักษณะคงที่ตามเงื่อนไขของช่วง Constant Current (CC) อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบเข้าสู่ช่วง CV พบว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีลักษณะลดลงและกลับมาเพิ่มขึ้นซ้ำเป็นช่วง ๆ ส่งผลให้กราฟกระแสไฟฟ้าเกิดความไม่ต่อเนื่องและมีลักษณะ Oscillation ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของการชาร์จแบบ CC-CV ในสภาวะปกติ



รูปที่ 4.15 พฤติกรรมกระแสไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่โปรไฟล์ 60V 5A

จากรูปที่ 4.15 สามารถสังเกตได้ว่าความไม่ต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในช่วง CV ของกระบวนการชาร์จ โดยสาเหตุหลักเกิดจากแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่บางเซลล์เพิ่มสูงขึ้นเร็วกว่ากลุ่มเซลล์อื่น ส่งผลให้ระบบ BMS ทำการตัดวงจรการชาร์จชั่วคราวเพื่อป้องกันแรงดันเกินของเซลล์แบตเตอรี่ และเมื่อแรงดันของเซลล์ลดลงจากกระบวนการ Balancing ระบบจึงกลับมาทำการชาร์จอีกครั้ง พฤติกรรมดังกล่าวทำให้เกิดการตัดและต่อของกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องในช่วงท้ายของ

การชาร์จ และสะท้อนให้เห็นว่าระบบ Balancing ของ BMS ไม่สามารถปรับสมดุลแรงดันของแต่ละเซลล์ได้ทันต่ออัตราการชาร์จภายใต้โปรไฟล์ 60V 5A

เพื่อยืนยันสาเหตุของพฤติกรรมดังกล่าว จึงทำการตรวจสอบข้อมูลแรงดันของแต่ละเซลล์ผ่านระบบ BMS ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงทั้งพฤติกรรมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าระหว่างการชาร์จร่วมกับข้อมูลแรงดันรายเซลล์ของแบตเตอรี่ โดยพบว่าหลังจากระบบเข้าสู่ช่วง CV ค่าแรงดันรวมของแบตเตอรี่เริ่มเข้าสู่ระดับคงที่บริเวณประมาณ 65 ถึง 66 V ขณะที่กระแสไฟฟ้ามีลักษณะลดลงตามพฤติกรรมของการชาร์จแบบ CC-CV อย่างไรก็ตาม ในช่วงท้ายของการชาร์จพบว่ากระแสไฟฟ้าเกิดการตัด–ต่ออย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับการทำงานของระบบ BMS ที่เข้าสู่กระบวนการ balancing เพื่อควบคุมแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ไม่ให้เกินค่าป้องกันที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.16 พฤติกรรมการ Balancing ของแบตเตอรี่และข้อมูลแรงดันรายเซลล์จากระบบ BMS

จากรูปที่ 4.16 ยังพบว่าเซลล์บางลำดับมีค่าแรงดันสูงกว่ากลุ่มเซลล์อื่นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเซลล์ลำดับที่ 15 ซึ่งมีค่าแรงดันประมาณ 4.055 V ขณะที่เซลล์ส่วนใหญ่ยังมีค่าแรงดันต่ำกว่า ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันภายในแพ็กแบตเตอรี่ ทั้งนี้ระบบ BMS จึงทำการ Balancing และตัดการชาร์จเป็นช่วง ๆ เพื่อป้องกัน Overvoltage ของเซลล์ดังกล่าว ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในช่วง CV มีลักษณะ Oscillation และไม่ต่อเนื่องตามที่ปรากฏในกราฟกระแสไฟฟ้า

ผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จ โดยเฉพาะในช่วง CV ซึ่งเป็นช่วงที่เซลล์แบตเตอรี่มีความไวต่อแรงดันสูงและต้องอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องชาร์จและระบบ BMS อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าระบบ Monitoring และ Supervisory layer ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของกระบวนการชาร์จได้อย่างชัดเจนผ่าน Grafana Dashboard และข้อมูลจากระบบ BMS ทำให้สามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวสำหรับวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการ Balancing ของแบตเตอรี่ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5.4 การคำนวณประสิทธิภาพของระบบชาร์จแบตเตอรี่

ในการประเมินสมรรถนะของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบชาร์จจากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าฝั่งขาเข้า (AC Input Energy) และพลังงานไฟฟ้าฝั่งขาออก (DC Output Energy) โดยข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ถูกตรวจวัดผ่าน Power Meter รุ่น PM2200 ขณะที่ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ถูกตรวจวัดผ่านมิเตอร์ PZEM-017 ทั้งนี้ข้อมูลจากทั้งสองส่วนถูกจัดเก็บผ่าน Node-RED และฐานข้อมูล InfluxDB เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบชาร์จในแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบชาร์จอ้างอิงตามสมการที่ (15) ในบทที่ 2 ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าฝั่ง AC ที่ระบบดึงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าฝั่ง DC ที่ถูกส่งเข้าสู่แบตเตอรี่ ทั้งนี้ผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบชาร์จในแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยค่าประสิทธิภาพที่ได้สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากฝั่ง AC ไปยังฝั่ง DC ภายใต้เงื่อนไขการชาร์จแบบ CC-CV

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องชาร์จเดลต้าชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละโปรไฟล์

โปรไฟล์แบตเตอรี่	**พารามิเตอร์ AC**	**พารามิเตอร์ DC**		**ประสิทธิภาพ η**
		Nominal	Max. V	
24V25Ah	230V 0.60A PF = 0.95	24V 5A	25.2V	96.1%
48V25Ah	230V 1.21A PF = 0.95	48V 5A	50.4V	95.3%
60V25Ah	230V 1.61A PF = 0.95	60V 5A	67.2V	95.5%
72V25Ah	230V 6.02A PF = 0.95	72V 15A	84V	95.8%

*พารามิเตอร์ AC ดึงจาก Google Sheet มาช่วง CC คงที่ และ PF ที่ Nameplate เครื่องชาร์จ

ค่าพารามิเตอร์ฝั่ง AC ได้จากการตรวจวัดในช่วง Constant Current (CC) ผ่านระบบบันทึกข้อมูล Google Sheets ร่วมกับค่า Power Factor (PF) ตามข้อมูล Nameplate ของเครื่องชาร์จ ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ฝั่ง DC ได้จากการตรวจวัดผ่านมิเตอร์ PZEM-017 ในระหว่างกระบวนการชาร์จ ทั้งนี้ค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้สะท้อนความสามารถของระบบในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากฝั่ง AC ไปยังฝั่ง DC ภายใต้เงื่อนไขการชาร์จแบบ CC-CV ของแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่

4.6 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานร่วมกันระหว่าง Communication layer, Execution layer และ Supervisory layer ได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ โดยระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen และส่งข้อมูลผ่าน MQTT ไปยัง Node-RED เพื่อใช้สำหรับประมวลผล ควบคุมรีเลย์ผ่าน Modbus RTU รวมถึงจัดเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล InfluxDB ได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้ระบบยังสามารถติดตามและแสดงผลข้อมูลพลังงานไฟฟ้าทั้งฝั่ง AC และ DC ผ่าน Grafana Dashboard แบบ Real-time ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV ได้อย่างชัดเจน โดยผลการตรวจวัดพบว่าพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสมมีลักษณะสอดคล้องกับทฤษฎีของการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในทุกโปรไฟล์การชาร์จ

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จ โดยเฉพาะในช่วง Constant Voltage (CV) ซึ่งระบบ BMS จะทำการ Balancing และตัดต่อกระบวนการชาร์จเพื่อป้องกันแรงดันเกินของเซลล์แบตเตอรี่ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้ามีลักษณะไม่ต่อเนื่องในบางช่วงของการชาร์จ ทั้งนี้ระบบ Monitoring และ Supervisory layer ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติดังกล่าวได้อย่างชัดเจนผ่าน Grafana Dashboard และข้อมูลจากระบบ BMS ขณะเดียวกันผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบชาร์จพบว่าระบบมีค่าประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 95–96% ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากฝั่ง AC ไปยังฝั่ง DC ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขการชาร์จแบบ CC-CV ของแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำแบบอัตโนมัติผ่านเครือข่าย CANopen ร่วมกับระบบควบคุมและติดตามข้อมูลพลังงานของระบบชาร์จ โดยใช้แนวคิด Supervisory system เพื่อเชื่อมโยง Communication layer, Execution layer และ Monitoring layer เข้าด้วยกัน ทั้งนี้ระบบใช้ ESP32 เป็น CANopen node สำหรับรับและส่งข้อมูล CAN ID เพื่อเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ก่อนส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยัง Node-RED ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผล ควบคุมรีเลย์ผ่าน Modbus RTU และจัดเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล InfluxDB สำหรับการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real-time ผ่าน Grafana Dashboard

ผลการทดลองในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างถูกต้องตามค่า CAN ID ที่กำหนด และสามารถควบคุมกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV ได้อย่างมีเสถียรภาพในทุกโปรไฟล์แบตเตอรี่ ได้แก่ 24V5A, 48V5A, 60V5A และ 72V15A โดยค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าสะสม มีพฤติกรรมสอดคล้องกับทฤษฎีของการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบ CC-CV ทั้งในฝั่ง AC และ DC นอกจากนี้ ระบบยังสามารถจัดเก็บข้อมูลลงใน Google Sheets และ InfluxDB เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงาน คำนวณต้นทุนด้านพลังงานผ่านโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU และประเมินประสิทธิภาพของระบบชาร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบชาร์จ พบว่าระบบมีค่าประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 95 ถึง 96% ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากฝั่ง AC ไปยังฝั่ง DC ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขการชาร์จแบบ CC-CV ของแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่ ทั้งนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ส่งผล

ต่อเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จในช่วง CV โดยระบบ BMS จะทำการ Balancing และตัดต่อการชาร์จเพื่อป้องกันแรงดันเกินของเซลล์ อย่างไรก็ตาม ระบบ Monitoring และ Supervisory layer ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติดังกล่าวผ่าน Grafana Dashboard และข้อมูลจากระบบ BMS ได้อย่างชัดเจน

โดยสรุป ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานร่วมกันระหว่าง CANopen, MQTT, Modbus RTU, Node-RED, InfluxDB และ Grafana ได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งในด้านการควบคุม การติดตามข้อมูล และการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ ส่งผลให้งานวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงแนวทางการพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่แบบ Supervisory system ที่มีความยืดหยุ่น มีเสถียรภาพ และสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบชาร์จแบตเตอรี่ในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะข้อจำกัดของงานวิจัย

แม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพในการควบคุมกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติม โดยเฉพาะในส่วนของการจัดการสมดุลแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเซลล์ส่งผลให้ระบบ BMS ต้องทำการ Balancing และตัดต่อการชาร์จในช่วง CV ส่งผลให้กระแสไฟฟ้ามีลักษณะไม่ต่อเนื่องในบางช่วงของการชาร์จ ทั้งนี้ข้อจำกัดดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบชาร์จไม่ได้ขึ้นอยู่กับเครื่องชาร์จเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสมรรถนะของระบบแบตเตอรี่และ BMS ที่ใช้งานร่วมกันด้วย

นอกจากนี้ ระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จในงานวิจัยนี้ยังคงเป็นรูปแบบ Predefined charging profile ซึ่งไม่สามารถปรับค่ากระแสและแรงดันแบบ adaptive ตามสถานะของแบตเตอรี่ได้แบบ real-time อีกทั้งการทดลองยังดำเนินการในระดับ Prototype ภายในห้องปฏิบัติการ ทำให้ยังไม่ได้มีการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริงระยะยาวหรือภายใต้โหลดที่หลากหลาย รวมถึงยังไม่มีการนำข้อมูลเชิงลึกจาก BMS เช่น State of Charge (SOC), State of Health (SOH) และอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่มาใช้ร่วมในการตัดสินใจของระบบควบคุม

5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาในอนาคต

สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อยอดในอนาคต สามารถพัฒนาระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้รองรับ Adaptive charging profile เพื่อให้ระบบสามารถปรับค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ตามสถานะของแบตเตอรี่แบบ Real-time โดยอ้างอิงข้อมูลจากระบบ BMS เช่น SOC, SOH และ

อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้มากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ยังสามารถพัฒนาระบบ Supervisory layer ให้รองรับ Fault detection และ Predictive monitoring เพื่อใช้สำหรับตรวจจับความผิดปกติของระบบชาร์จและแบตเตอรี่ล่วงหน้า รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้เทคนิค Machine learning หรือ Data analytics ร่วมกับข้อมูลที่จัดเก็บใน InfluxDB เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบและคาดการณ์ความผิดปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ระบบยังสามารถต่อยอดให้รองรับ Multi-charger หรือ Multi-battery system เพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมหรือระบบจัดการพลังงานขนาดใหญ่ในอนาคต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

A. Tarascon and M. Armand, “Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries,” Nature, vol. 414, no. 6861, pp. 359–367, 2001, doi: 10.1038/ 35004644.

B. Scrosati and J. Garche, “Lithium batteries: Status, prospects and future,” Journal of Power Sources, vol. 195, no. 9, pp. 2419–2430, 2010, doi: 10.1016/ j.jpowsour. 2009.11.048.

M. Notten, F. Roozeboom, R. Niessen, and L. Baggetto, “3-D Integrated All-Solid-State Rechargeable Batteries,” in Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices, Sensors and Actuators, Elsevier, 2007, pp. 411–456, doi: 10.1016/ B978-044452745-5.50016-8.

T. Kim, W. Song, D.-Y. Son, L. K. Ono, and Y. Qi, “Lithium-Ion Batteries: Outlook on Present, Future, and Hybridized Technologies,” Batteries, vol. 7, no. 4, p. 76, 2021, doi: 10.3390/batteries7040076.

A. Manthiram, “A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry,” Energy & Environmental Science, vol. 10, no. 11, pp. 2300–2307, 2017, doi: 10.1039/ C7EE02555F.

K. Balasingam, M. Mohammadi, and M. Foreman, “Battery Management Systems for Electric Vehicles,” Energies, vol. 13, no. 11, p. 2825, 2020, doi: 10.3390/ en13112825.

P. Keil and A. Jossen, “Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life-An experimental study with different 18650 high-power cells,” Journal of Energy Storage, vol. 6, pp. 125–141, 2016, doi: 10.1016/j.est.2016.02.005

I. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, “Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 56, pp. 572–587, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.042.

R. Bosch, “CAN Specification Version 2.0,” SAE Technical Paper, no. 910294, 1991, doi: 10.4271/910294.

D. Paret, Multiplexed Networks for Embedded Systems: CAN, LIN, FlexRay, Safe-by-Wire..., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007, doi: 10.1002/97 80470 611166.

A. Banks and R. Gupta, MQTT Version 3.1.1, NIST Special Publication 500-322, 2014, doi: 10.6028/NIST.SP.500-322.

N. O’Leary, “Node-RED: Flow-based programming for the Internet of Things,” IBM Emerging Technology, 2013.

P. Toshniwal, S. Taneja, A. Shukla, K. Ramasamy, J. Patel, and S. Kulkarni, “Storm@twitter,” Proceedings of the 2014 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 147–156, 2014, doi: 10.14778/ 2733 004.2733005.

S. M. Naqvi, M. A. Khan, and T. A. Cheema, “Implementation of IoT Based Smart Energy Metering System,” in 2017 International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS), 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/ ICRIIS.2017.8002510.

B. Wilkinson and M. Allen, Parallel Programming: Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2005, doi: 10.1007/0-387-28695-0.

A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O’Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Y. Li, S. Zheng, S. Vetterlein, M. Gao, J. Du, M. Parkes, M. Ouyang, M. Marinescu, G. Offer, and B. Wu, “Lithium-ion battery fast charging: A review,” eTransportation, vol. 1, p. 100011, 2019, doi: 10.1016/j.etran.2019.100011.

R. Guo and W. Shen, “A Review of Equivalent Circuit Model Based Online State of Power Estimation for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles,” Vehicles, vol. 4, no. 1, pp. 1–29, 2022, doi: 10.3390/vehicles4010001.

C. Yanpreechaset, N. Donjaroennon, S. Nuchkum, and U. Leeton, “Development of an EV Battery Management Display with CANopen Communication,” World Electric Vehicle Journal, vol. 16, no. 7, p. 375, 2025, doi: 10.3390/wevj16070375.

N. Donjaroennon, W. Nambunlue, S. Nuchkum, and U. Leeton, “Development of an Improved Communication Control System for ATV Electric Vehicles Using MRS Developers Studio,” World Electric Vehicle Journal, vol. 15, no. 7, p. 303, 2024, doi: 10.3390/wevj15070303.

H. He, R. Xiong, and J. Fan, “Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach,” Measurement, vol. 89, pp. 125–134, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.05.055.

N. C. Găitan, I. Zagan, and V. G. Găitan, “Proposed Modbus Extension Protocol and Real-Time Communication Timing Requirements for Distributed Embedded Systems,” Technologies, vol. 12, no. 10, p. 187, 2024, doi: 10.3390/technologies12100187.

N. B. Mohd Faizu, A. M. Roslizar, M. A. Z. Zaini, F. Idris, Z. Berahim, and A. A. Latiff, “IoT-based real-time monitoring of agricultural wastewater using Raspberry Pi, Node-RED, and Grafana,” Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 14, no. 6, pp. 4665–4677, 2025, doi: 10.11591/eei.v14i6.10170.

I.-V. Niţulescu and A. Korodi, “Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions,” IoT, vol. 1, no. 1, pp. 76–91, 2020, doi: 10.3390/iot1010005.

A. Elmarkez, S. Mesli-Kesraoui, P. Berruet, and F. Oquendo, “Security by Design for Industrial Control Systems from a Cyber–Physical System Perspective: A Systematic Mapping Study,” Machines, vol. 13, no. 7, p. 538, 2025, doi: 10.3390/machines13070538.

Q. Ali, W. Shahzad, I. Ahmad, S. Safiq, X. Bin, S. M. Abbas, and H. Sun, “Recent developments and challenges on beam steering characteristics of reconfigurable transmitarray antennas,” Electronics, vol. 11, no. 4, p. 587, 2022, doi: 10.3390/electronics11040587.

Garcia, A., Oregui, X., Franco, J., Arrieta, U., Ferreres, J., & Valencia, J. A. Time Series Manufacturing Data Edge Monitoring and Visualization to Support Industrial Maintenance Teams. SN Computer Science, 2023, 5, 131. DOI: https://doi.org/10.1007/s42979-023-02442-4.

Grzesik, P., & Mrozek, D. Comparative Analysis of Time Series Databases in the Context of Edge Computing for IoT and Smart Systems. Computational Science – ICCS 2020, Lecture Notes in Computer Science (Springer), 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50417-5_38

Alcaraz, C., Cumplido, J. & Trivino, A. OCPP in the spotlight: threats and countermeasures for electric vehicle charging in-frastructures 4.0. Int. J. Inf. Secur. 22, 1395–1421 (2023). https://doi.org/10.1007/s10207-023-00698-8

Hsaini, S.; Ghogho, M.; Charaf, M.E.H. An OCPP-Based Approach for Electric Vehicle Charging Management. Energies 2022, 15, 6735. https://doi.org/ 10.3390/ en15186735

Z. Garofalaki, D. Kosmanos, S. Moschoyiannis, D. Kallergis and C. Douligeris, "Electric Vehicle Charging: A Survey on the Security Issues and Challenges of the Open Charge Point Protocol (OCPP)," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 3, pp. 1504-1533, thirdquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3184448

C. Alcaraz, J. Lopez and S. Wolthusen, "OCPP Protocol: Security Threats and Challenges," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 5, pp. 2452-2459, Sept. 2017, doi: 10.1109/TSG.2017.2669647

Adamska, P., Juźwin, M., Wierzbicki, A. (2020). Picking Peaches or Squeezing Lemons: Selecting Crowdsourcing Workers for Reducing Cost of Redundancy. In: Krzhizhanovskaya, V., et al. Computational Science – ICCS 2020. ICCS 2020. Lecture Notes in Computer Science(), vol 12138. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50417-5_38

Găitan, V. G., & Zagan, I. Modbus RTU Protocol Timing Evaluation for Scattered Holding Register Read and ModbusE-Related Implementation. Processes, 2025, 13(2), 367. DOI: https://doi.org/10.3390/pr13020367

Sun, C., Wang, L., & Zheng, J. Design and Development of Modbus/MQTT Gateway for Industrial IoT Applications. 2019 IEEE Conference on Automation, USA, 2019. DOI: https://doi.org/10.1109/CAC48633.2019.8997492

Sánchez Ocaña, W. E., Navas-Castellanos, A., Salazar-Jácome, E., & Chancusig-Muso, C. Validation of the Functionality of an Industrial Network Based on RS-485 and Industrial Ethernet Protocols for Multivariable Processes. International Review of Automatic Control (IREACO), 2023, 16(3), 162–170. DOI: https://doi.org/10.15866/ireaco.v16i3.23793

Putra, N. P. IoT-Based kWh Monitoring Prototype Using PZEM-004T Sensor and NodeMCU ESP8266 Microcontroller: A Comprehensive Experimental Evaluation. Journal of Emerging Innovations in Engineering (JEIE), 2025, 1(02), 11. DOI: https:// doi.org/10.65664/jeie.v1i02.11

Pawar, J. P., Amirthaganesh, S., ArunKumar, S., Satiesh, K. B. Real-time energy measurement using smart meter. 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (ICGET), 2016, pp. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/GET.2016.7916747

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Donjaroennon, N.; Nuchkum, S.; Suddeepong, C.; Leeton, U. Design and Experimental Validation of a Charging Profile Selection System for Electric ATVs Using a Programmable Delta Charger with CANopen and Modbus RTU Communication. Energies 2026, 19, 1310. https:// doi.org/10.3390/ en19051310

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

energies

MDPI

Article

Design and Experimental Validation of a Charging Profile Selection System for Electric ATVs Using a Programmable Delta Charger with CANopen and Modbus RTU Communication

Natthapon Donjaroennon [1], Suphatchakan Nuchkum [2], Chatchai Suddeepong [2] and Uthen Leeton [1,*]

[1] School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; d6500467@g.sut.ac.th
[2] School of Mechatronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
* Correspondence: uthenleeton@sut.ac.th

Abstract

This paper presents the design and experimental validation of a hardware-enforced charging profile selection framework for low-voltage electric all-terrain vehicles (ATVs), implemented on a programmable Delta battery charger operating within a voltage range of 0–120 V and a current range of 0–30 A. Unlike conventional programmable chargers that rely primarily on software-defined configuration or battery management system (BMS)-negotiated parameter setting, the proposed system enforces predefined constant-current–constant-voltage (CC–CV) charging profiles at the hardware execution layer. Vehicle identification is performed using CANopen-based identifiers, while relay-based selection, controlled via Modbus RTU, physically routes the charger output to fixed CC–CV control paths, thereby structurally reducing the risk of misconfiguration and unintended parameter changes. The system integrates layered control using embedded ESP32 nodes, a redPLC supervisory controller, and NodeRED-based orchestration, combined with real-time measurement, logging, and visualization using a time-series database and Grafana dashboards. Experimental validation is conducted using lithium-ion battery packs configured at four nominal voltage levels (24 V, 48 V, 60 V, and 72 V). The results confirm correct automatic profile selection, deterministic relay-based routing, and stable CC–CV charging behavior across repeated charging sessions. Rather than proposing a new charging algorithm, this work contributes a safety-by-design execution-layer charging architecture that complements higher-level smart charging and management protocols and is particularly suited for closed, heterogeneous fleet environments where deterministic behavior, robustness against configuration errors, and transparent verification of charging processes are critical.

Keywords: charging profile selection; programmable charging system; electric all-terrain vehicle; CANopen communication; Modbus RTU communication

Check for updates

Academic Editor: Hwa-Dong Liu

Received: 2 February 2026
Revised: 23 February 2026
Accepted: 27 February 2026
Published: 5 March 2026

Copyright: © 2026 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

1. Introduction

The rapid growth of electric vehicles (EVs) and the electrification of industrial service vehicles have significantly increased the demand for reliable, scalable, and safe battery charging systems, particularly in mission-critical applications such as airport ground support equipment (GSE) [1–3]. From an energy conversion perspective, battery charging systems are fundamentally power electronic systems responsible for regulating voltage and current delivered to the battery. In such environments, charging infrastructures must

support continuous operation, high availability, and multiple vehicle types with different operating requirements. Consequently, the performance, robustness, and safety of the charger hardware directly affect energy efficiency, battery lifetime, and operational continuity. In this work, although the target application is airport service vehicles, an electric all-terrain vehicle (ATV) is employed as a representative experimental platform to emulate the charging behavior and operating conditions of this class of industrial electric vehicles.

In practical deployments, industrial electric vehicles and service vehicles are often equipped with battery systems of different chemistries, capacities, and nominal voltage levels, leading to heterogeneous charging requirements [4–7]. This situation is particularly common in airport service fleets, such as baggage tractors and other GSE, where vehicles of different generations and specifications coexist within the same charging facility. From the viewpoint of battery charging principles, most lithium-based batteries rely on constant-current–constant-voltage (CC–CV) charging strategies, and the correctness of voltage and current setpoints is critical. Even a small deviation or an incorrect parameter selection may accelerate battery degradation or cause safety risks [8–10]. Therefore, in multi-voltage and multi-capacity charging environments, the correct selection and enforcement of charging profiles become a key engineering requirement rather than merely a configuration issue.

To manage the growing scale and complexity of charging installations, communication and supervision frameworks have been introduced into EV charging systems [11–14]. In this context, the Open Charge Point Protocol (OCPP) has been widely adopted for charging management, monitoring, and coordination in large-scale deployments. However, these communication-oriented solutions mainly operate at the supervisory and management levels. They do not directly guarantee that the safety-critical voltage and current limits are enforced at the power hardware level. As a result, even in well-managed charging infrastructures, the final responsibility for safe charging behavior still rests on the correct configuration and reliable operation of the charger hardware itself.

In addition to communication frameworks and charging infrastructure management, several studies have examined electric vehicle deployment policies, demand-side management, and coordinated control strategies to support large-scale electrification. These works provide important insights into grid integration, infrastructure planning, and system-level optimization of charging operations. While such approaches address broader planning and operational aspects, they do not directly ensure deterministic enforcement of charging parameters at the execution layer. Therefore, the present work focuses on hardware-level mechanisms that complement these higher-level strategies by providing robust and verifiable charging profile enforcement.

Along with the increasing connectivity and configurability of charging systems, cybersecurity and operational reliability issues have also attracted considerable attention [15–17]. Software faults, communication failures, or human errors during configuration may all result in incorrect charging parameters being applied. From a power electronics perspective, such faults are particularly dangerous because they directly affect the electrical output of the charger. In heterogeneous battery environments, these issues may not only cause immediate unsafe charging conditions but may also lead to long-term battery degradation. This observation highlights that misconfiguration is not merely an IT or management problem but a fundamental engineering safety issue in modern programmable charging systems.

In parallel, many studies have investigated EV charging infrastructures from system-level and operational viewpoints, including station operation, scheduling, and large-scale deployment planning [18–20]. While these studies provide valuable insights into infrastructure-level coordination and energy management, the practical problem of deterministic charging profile selection and hardware-level enforcement for heterogeneous battery systems remains insufficiently addressed. In real charging facilities, battery packs

https://doi.org/10.3390/en19051310

with different nominal voltages and capacities often coexist, and even a single incorrect parameter setting may directly result in unsafe charging behavior or irreversible battery damage. To address this gap, this work focuses explicitly on the execution layer of the charging process and investigates how charging correctness and robustness can be structurally improved through hardware-enforced design principles. Rather than proposing a new charging algorithm or replacing higher-level smart charging, scheduling, or management frameworks, the proposed approach targets the safety-critical interface between vehicle identification and power delivery. By binding vehicle-side identifiers to relay-selected, hardware-configured constant-current–constant-voltage (CC–CV) charging paths, the system reduces reliance on runtime software configuration, backend negotiation processes and operator intervention for voltage and current enforcement. This execution-layer perspective complements existing supervisory and management-oriented charging architectures by providing deterministic and verifiable enforcement of charging parameters at the physical power interface, which is particularly relevant in closed and heterogeneous fleet environments where misconfiguration risk and operational robustness are primary concerns. Motivated by these challenges, this paper presents the design and experimental validation of a charging profile selection framework that emphasizes deterministic enforcement of charging parameters at the execution layer. An electric all-terrain vehicle (ATV) is used as a representative experimental platform to emulate heterogeneous industrial electric vehicle operating conditions. The proposed system is implemented on a programmable Delta charger and integrates CANopen-based vehicle identification with Modbus RTU-controlled relay selection to physically route the charger output to predefined constant-current–constant-voltage (CC–CV) charging paths. By enforcing voltage and current limits through hardware-configured control paths rather than runtime software configuration alone, the framework reduces susceptibility to misconfiguration, communication faults, and operator errors in multi-voltage charging environments. The platform operates within a voltage range of 0–120 V and a current range of 0–30 A and is experimentally validated using real-time monitoring and verification of charging behavior. The proposed approach is intended to complement higher-level charging management and coordination frameworks by providing a robust and verifiable execution mechanism for safety-critical charging operations.

- The design of a charging profile selection system for programmable battery chargers that integrates CANopen-based vehicle identification and Modbus RTU–based relay control to enforce CC–CV charging parameters at the hardware level.
- The implementation of a hardware-enforced charging profile selection mechanism that significantly reduces the risk of configuration errors and human error when charging battery systems with different nominal voltage levels.
- The experimental validation of the proposed system using an electric ATV as a representative experimental platform, demonstrating its feasibility, stability, and practical effectiveness for multi-voltage battery charging applications.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 describes the overall system architecture and design principles. Section 3 presents the system implementation and experimental setup. Section 4 discusses the experimental results. Finally, Section 5 concludes the paper and outlines future work.

2. System Architecture and Hardware Implementation

2.1. Overall System Architecture and Charging Operation

Before describing the detailed architecture, it is important to clarify the design rationale underlying the proposed charging profile selection system. The system is intentionally

https://doi.org/10.3390/en19051310

structured as a layered architecture to separate vehicle identification, supervisory control, and power enforcement functions, thereby reducing coupling between software decision logic and safety-critical power control. Relay-based profile selection is adopted to provide deterministic and physically verifiable routing of charging parameters, ensuring that predefined voltage and current limits remain enforceable even under communication delays, software faults, or configuration errors. This design prioritizes robustness and operational transparency over runtime flexibility, which is particularly advantageous in heterogeneous fleet environments where predictable charging behavior is essential.

Figure 1 illustrates the overall hardware and communication architecture of the proposed programmable charging system designed for electric vehicles with heterogeneous battery voltage levels, represented in this work by electric all-terrain vehicles (ATVs). The system architecture is structured to eliminate manual charger configuration by enabling automatic battery identification, adaptive constant-current–constant-voltage (CC–CV) charging profile selection, and integrated data acquisition through coordinated communication, control, and power subsystems [21–23].

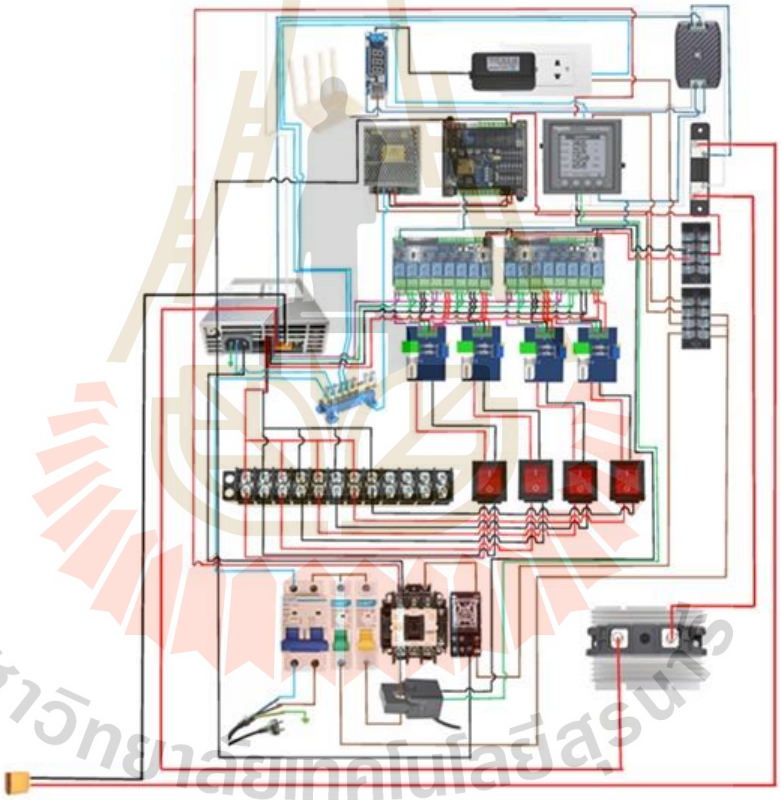


Figure 1. Overall hardware and communication architecture of the proposed automatic charging system for low-voltage electric vehicles. The architecture integrates vehicle-side identification, supervisory control, relay-based CC–CV selection, measurement devices, and data acquisition components. Red and black lines indicate DC power connections; blue and brown lines represent AC supply wiring; all remaining colored lines denote RS485 communication signals.

https://doi.org/10.3390/en19051310

Experimental validation is conducted using NMC battery packs with nominal ratings of 24 V 5 A, 48 V 5 A, 60 V 5 A, and 72 V 15 A, which are selected as scaled-down representative configurations for experimental validation. Although the Delta programmable charger supports a wide operating range of 0–120 V and 0–30 A, the experiments are intentionally performed at lower current levels to validate the system design, control logic, and hardware-enforced charging profile selection. The target charging current of approximately 20 A at different voltage levels is therefore considered, and the proposed system is directly scalable to higher charging current levels supported by the power conversion hardware.

When the charging cable is connected, communication between the electric vehicle and the charging system is initiated via the CANopen protocol. Each vehicle transmits a predefined CAN identifier (CAN ID) corresponding to a specific CC–CV charging configuration. CANopen is selected due to its deterministic communication behavior, robustness, and widespread adoption in industrial control environments [24,25]. This identifier-based mechanism allows unambiguous battery recognition at the moment of connection without requiring any operator intervention [26].

Upon reception of the CAN ID, the charger-side ESP32 module forwards the identification data to the redPLC controller via MQTT. The redPLC serves as the primary supervisory unit, coordinating system initialization, safety supervision, and communication management [27]. Higher-level control functions, including NodeRED execution, are enabled only after the system verifies that all operational and safety conditions are satisfied. This layered design establishes the redPLC as a supervisory control layer that bridges the charger hardware with software-based configuration and monitoring functions [28].

Once NodeRED is activated, it subscribes to relevant MQTT topics and processes the received CAN ID information using dedicated function nodes. The control logic is explicitly divided into independent branches, each corresponding to a predefined battery charging configuration. Based on the decoded CAN ID, NodeRED triggers the appropriate RS-485 relay modules to select one of four fixed CC–CV control boards connected to the Delta programmable charger. Each board is preconfigured for a specific voltage and current profile, enabling deterministic and electrically isolated output selection [29,30]. This relay-based selection mechanism enhances operational reliability and scalability while reducing the risk of misconfiguration for additional battery configurations in industrial charging environments [31].

From a safety perspective, the layered control structure ensures that charging operations are enabled only after successful system initialization and verification of communication integrity across all subsystems. In the event of communication loss, identifier mismatch, or abnormal operating conditions, the system remains in a safe state by preventing unintended relay activation and maintaining previously enforced charging limits. This fail-safe behavior enhances operational reliability and reduces the risk of unintended profile selection during real-world deployment.

2.2. *CANopen-Based Vehicle Identification and CC–CV Selection*

Figure 2 illustrates the CANopen-based communication architecture between electric vehicles and the charging system. Each ATV is equipped with an ESP32-based CANopen node configured as a transmitter, while the charger-side ESP32 acts as a CANopen receiver. When the charging cable is connected, the vehicle-side node immediately initiates the CANopen boot-up sequence and transmits a predefined CAN identifier (CAN ID) that represents the nominal battery voltage level and the associated CC–CV charging profile [32].

To ensure deterministic and reliable operation in an industrial environment, the CANopen protocol is adopted due to its well-defined communication objects, node management mechanisms, and error-handling features [33,34]. After the physical connection is

https://doi.org/10.3390/en19051310

established, the charger-side ESP32 waits for a valid CANopen frame within a predefined timeout window. If no valid identifier is received, the system remains in an idle and safe state, preventing any unintended activation of the power stage [35].

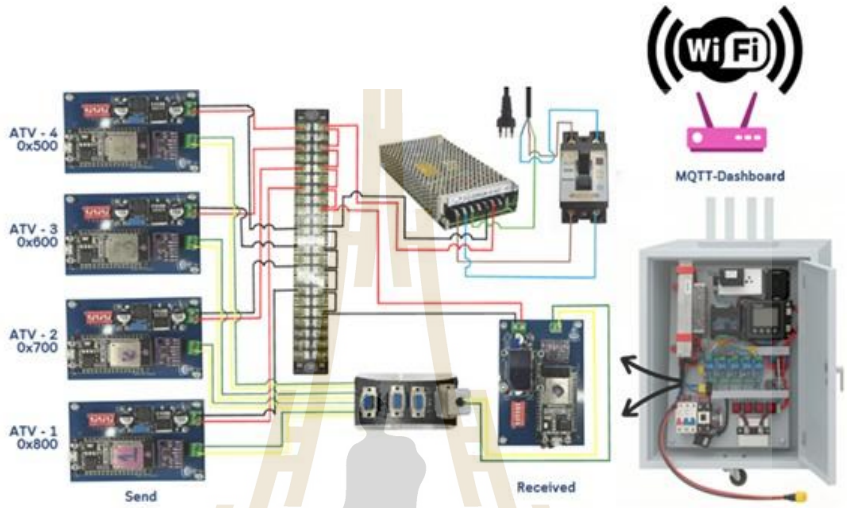


Figure 2. CANopen-based communication architecture between electric vehicles and the charging cabinet. Vehicle-side ESP32 modules transmit predefined CAN identifiers to the charger-side receiver to enable automatic battery identification and charging profile selection. (Red and black lines indicate DC power connections; blue and brown lines represent AC supply wiring; green and yellow lines denote CAN communication signals.)

Once the CAN ID is successfully received and validated, the charger-side ESP32 encapsulates the identification data and forwards it to the redPLC via MQTT. At this stage, the redPLC performs basic safety checks and state verification before enabling higher-level control functions. This two-stage validation process (vehicle-side identification followed by charger-side verification) improves robustness against communication faults and unintended connections [36].

To guarantee unique and traceable identification, each ESP32 installed on an ATV uses its embedded chip ID as a root identifier. During system initialization, this chip ID is mapped to a specific CAN ID corresponding to a predefined charging profile. The complete mapping between ESP32 chip IDs, CAN identifiers, and battery configurations is summarized in Table 1. Although the hardware platform supports a wide operating range of 0–120 V and 0–30 A, only four charging profiles are enabled in this prototype implementation in order to match the experimental validation requirements [37].

Table 1. Mapping between ESP32 chip identifiers, assigned CAN IDs, and corresponding battery configurations used for automatic vehicle and battery identification.

ESP32 Chip ID	Set CAN ID	Battery Configuration
0xF4D1B21AD6B8	0x500	24 V 5 A
0x1CB2F8BD9E7C	0x600	48 V 5 A
0xC0EA9B9EFC08	0x700	60 V 5 A
0x48BDF1BD9E7C	0x800	72 V 15 A

https://doi.org/10.3390/en19051310

From a system integration perspective, this identifier-based approach enables plug-and-charge functionality. The charging system does not rely on negotiation or manual parameter input but instead deterministically binds the physical vehicle identity to a specific hardware-enforced charging configuration. This design choice is particularly suitable for multi-vehicle environments with heterogeneous battery systems, where operational simplicity and configuration safety are critical [38].

Although the current implementation uses predefined mappings between device identifiers and charging profiles, the architecture is designed to support scalable deployment through configurable identifier registration and modular profile expansion. New vehicle types or battery configurations can be incorporated by extending identifier mappings without modifying the underlying enforcement mechanism, thereby preserving system stability while enabling future growth.

2.3. Fixed CC–CV Configuration Using Relay-Based Hardware Selection

Figure 3 illustrates the relay-based fixed CC–CV control mechanism implemented in the proposed charging system. Instead of dynamically setting voltage and current references through software commands alone, each charging profile is realized using a dedicated CC–CV control board. Each board implements a local control loop that regulates the output either in constant-current (CC) mode or constant-voltage (CV) mode, depending on the instantaneous battery voltage [39].

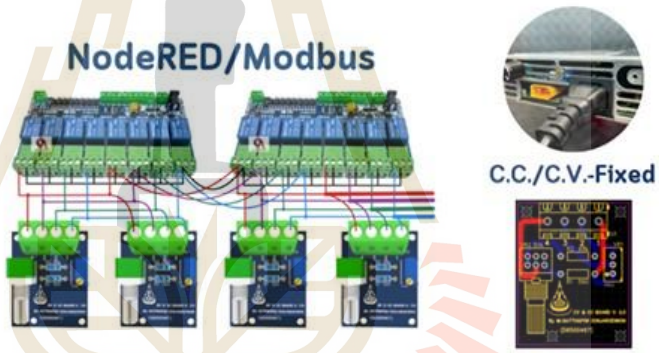


Figure 3. Relay-based fixed CC–CV charging control mechanism using Modbus RTU over RS-485 communication. Each predefined charging profile is implemented with a dedicated CC–CV control board, enabling deterministic voltage and current selection. (Red lines indicate current control connections; purple lines represent voltage control signals; green and blue lines denote DC power connections.)

The use of relay-based hardware selection is motivated by the requirement for deterministic isolation between charging configurations and the need to minimize the risk of unintended parameter switching. Unlike purely software-controlled profile selection, physical switching provides an additional layer of assurance that only the intended configuration is active at any given time. This approach improves traceability and strengthens confidence in safety-critical charging operations.

In the CC phase, the control loop maintains a constant output current until the battery voltage reaches the predefined voltage threshold. Once this threshold is reached, the controller transitions to CV mode and regulates the output voltage while the charging current gradually decreases. This two-stage CC–CV behavior is widely adopted in lithium-based battery charging systems due to its simplicity, safety, and effectiveness in preventing overcharge [40,41].

https://doi.org/10.3390/en19051310

In the proposed system, the voltage and current limits of each CC–CV control board are physically configured using DIP switches. The correspondence between DIP switch settings and the resulting voltage and current levels is summarized in Table 2, while the full selectable ranges supported by the control boards are listed in Table 3. By fixing these parameters at the hardware level, the system ensures that critical charging limits cannot be modified accidentally or maliciously by software-level commands [42]. This hardware-level parameter enforcement mechanism effectively eliminates misconfiguration risk and provides an additional safety layer for multi-voltage battery charging systems.

Table 2. Fixed CC–CV charging configurations selected through DIP switch settings corresponding to different CAN identifiers.

CAN/CC-CV-Fixed		Voltage [V]	Ampere [A]
0x500	24 V 5 A	001	000
0x600	48 V 5 A	011	000
0x700	60 V 5 A	100	000
0x800	72 V 15 A	101	010

Table 3. Voltage and current levels of the CC–CV charging profiles evaluated in this study.

	Voltage/Diff Switch		Ampere/Diff Switch	
Select Profile CC-CV	12 V	000	5 A	000
	24 V	001		
	36 V	010	10 A	001
	48 V	011		
	60 V	100	15 A	010
	72 V	101		
	84 V	110	20 A	011
	100 V	111		
			25 A	111

The selection among multiple CC–CV boards is performed using Modbus RTU–controlled relay modules over RS-485. Based on the decoded CAN ID, NodeRED commands the appropriate relay channel, which physically connects the selected control board to the Delta programmable charger output. This hardware-level switching mechanism ensures that only one charging profile can be activated at any given time and provides inherent electrical isolation between different configurations [43].

Although relay actuation is initiated by software logic, the actual charging parameters are fully defined by the hardware configuration of the selected CC–CV board. This hybrid control strategy combines the flexibility of software-based system orchestration with the determinism and safety of hardware-enforced parameter definition. As a result, the charging system exhibits predictable and repeatable behavior even in the presence of software faults or communication disturbances [44].

2.4. Control Logic and Communication via Modbus RTU

In addition to CANopen-based identification and relay-based CC–CV selection, the proposed system employs Modbus RTU as the primary field-level communication protocol for control commands and measurement data acquisition. Modbus RTU is selected due to its simplicity, robustness, and widespread adoption in industrial automation systems, particularly over the RS-485 physical layer [45,46].

https://doi.org/10.3390/en19051310

In the proposed architecture, the redPLC acts as the Modbus master and periodically polls all connected slave devices according to a predefined scheduling cycle. The slave devices include RS-485 relay modules for CC–CV board selection and power measurement instruments for both the AC input side and the DC output side. Each slave device is assigned a unique slave ID, and its internal registers are mapped to specific control or measurement functions [47].

The polling cycle is designed to ensure deterministic update intervals for both control and monitoring functions. Relay actuation commands are transmitted as discrete coil or register writes, while measurement values are retrieved using holding or input register reads. This master–slave communication structure avoids bus contention and ensures predictable timing behavior, which is essential for reliable operation in industrial control environments [48].

The RS-485 relay modules are configured as Slave ID 1 and Slave ID 2 and are responsible for physically switching the CC–CV control boards. For electrical measurements, a PZEM-017 module is used to measure DC-side voltage, current, power, and accumulated energy [49], while a PM2230 power meter is used for AC-side measurements. The complete Modbus RTU device configuration, including slave IDs and register address ranges, is summarized in Table 4.

Table 4. Modbus RTU device configuration and addressing scheme used for relay control and electrical parameter measurement.

Device Type	Function	Slave ID	Address Range	Description
RS-485 Relay Module 1	CC–CV relay control	1	0–8	Controls CC–CV board selection
RS-485 Relay Module 2	CC–CV relay control	2	0–8	Controls CC–CV board selection
PZEM-017	DC measurement	5	0–6	DC voltage, current, power, energy
PM2230	AC measurement	100	2999–3207	AC voltage, current, power, energy

From a system integration perspective, this Modbus-based fieldbus framework provides a clear separation between high-level supervisory control and low-level device actuation and sensing, thereby improving modularity, maintainability, and fault isolation.

While the proposed architecture introduces additional switching elements, their impact on overall charging efficiency is minimal due to the low contact resistance of industrial relay components. The design emphasizes reliable parameter enforcement and operational safety, with efficiency considerations remaining within acceptable limits for the intended application domain.

2.5. Data Acquisition, Logging, and Real-Time Visualization

Comprehensive data acquisition and monitoring are integral parts of the proposed charging system, as they provide both operational visibility and experimental validation capability. Electrical parameters are continuously measured on both the AC input side and the DC output side, enabling detailed analysis of power conversion efficiency, charging dynamics, and system behavior [50].

On the AC side, the PM2230 power meter provides measurements of voltage, current, active power, and accumulated energy. On the DC side, the PZEM-017 module measures the output voltage, charging current, instantaneous power, and delivered energy. These measurements are periodically collected by the redPLC via Modbus RTU and forwarded to the supervisory software layer [51]. All time-stamped measurement data are stored in

https://doi.org/10.3390/en19051310

an InfluxDB time-series database, which is optimized for high-frequency data ingestion and efficient temporal queries. This data management approach enables both real-time monitoring and long-term historical analysis. Grafana dashboards are used to visualize key system variables, including voltage and current trajectories, power flow, and charging state transitions [52,53]. The visualization environment supports verification of charging stability, profile selection correctness, and temporal consistency of measured electrical parameters during experimental operation.

Although the present experimental setup focuses on moderate charging currents, the same data acquisition and monitoring framework is directly applicable to higher-power charging systems, such as those required for airport ground service vehicles [54].

3. System Implementation and Experimental Validation

This section describes the system implementation and experimental validation platform of the proposed charging profile selection system. The primary objective is to verify the functional correctness, determinism, and safety of the identifier-based charging mechanism and the hardware-enforced CC–CV configuration under realistic operating conditions, rather than to evaluate charging performance metrics. The experimental platform is implemented using a programmable Delta battery charger and multiple low-voltage lithium-ion battery configurations. An electric all-terrain vehicle (ATV) is employed as a representative experimental platform to emulate the charging behavior of industrial electric vehicles with heterogeneous battery systems. This setup enables practical validation while maintaining general applicability. The experimental implementation is designed to evaluate functional correctness, deterministic profile selection, and robustness of the hardware-enforced charging mechanism under representative operating conditions. The focus of this validation is to confirm reliable coordination between identification, supervisory control, and hardware parameter enforcement rather than to optimize charging performance metrics.

The system implementation follows the architecture presented in Section 2 and reflects the actual signal and control flow of the charging process, from vehicle-side parameter encoding and CANopen-based identifier transmission to charger-side validation, hardware-level profile enforcement, and electrical parameter acquisition. Charging parameters are encoded through physical configuration mechanisms and mapped to predefined CANopen identifiers, enabling deterministic and unambiguous profile selection upon connection. In addition, supervisory control and field-level communication using Modbus RTU are integrated to coordinate relay-based profile selection and measurement acquisition, while preserving strict hardware enforcement of critical charging limits. The following subsections detail the embedded implementation, control logic, and experimental setup [55,56].

3.1. Embedded System Implementation Using ESP32 and CANopen

The proposed charging system employs ESP32 microcontrollers as embedded control units on both the vehicle side and the charger side. The ESP32 platform is selected due to its integrated CAN controller, sufficient computational capability, and suitability for real-time industrial communication and control applications. Vehicle–charger communication is realized using a CANopen-based communication layer operating over the CAN physical bus [57,58].

On the vehicle side, the ESP32 encodes the battery voltage and current configuration and transmits this information to the charging system via the CANopen network. During system initialization, a unique hardware identifier derived from the internal chip ID is deterministically mapped to a predefined CANopen identifier (CAN ID), where each CAN ID represents a validated CC–CV charging profile associated with a specific battery configuration. By embedding the charging profile information directly into the CANopen identifier,

https://doi.org/10.3390/en19051310

the system enables immediate and unambiguous vehicle and battery identification upon physical connection, without requiring manual configuration or software-level negotiation.

After the charging parameters are determined, the vehicle-side ESP32 periodically transmits the selected CANopen identifier and associated data frame over the CAN network. This periodic broadcast ensures that the charger-side controller always receives a valid and up-to-date identification frame prior to any power-stage activation, thereby improving robustness against transient communication disturbances. This deterministic and lightweight CANopen-based identification mechanism forms the foundation for subsequent charger-side validation and hardware-enforced charging profile selection. Detailed descriptions of the vehicle-side parameter encoding and CANopen frame packing procedures are provided in Appendix A.1 and Appendix A.2, respectively.

3.2. Charger-Side Validation and Hardware-Enforced CC–CV Profile Selection

Upon reception of a valid CANopen identifier (CAN ID) at the charger side, the proposed system associates the identifier with a predefined constant-current–constant-voltage (CC–CV) charging configuration. Instead of dynamically generating voltage and current setpoints through software control, the charging parameters are strictly enforced using hardware-configured CC–CV control boards. This design choice follows established hardware-enforced charging principles, which are widely adopted to improve safety and reliability in battery charging systems [59,60].

Each CC–CV control board implements a local analog control loop that regulates the charger output either in constant-current (CC) mode or constant-voltage (CV) mode, depending on the instantaneous battery voltage. The voltage and current limits of each board are physically preconfigured using DIP switches, as summarized in Tables 2 and 3 in Section 2. As a result, critical charging parameters are constrained at the hardware level and cannot be altered by software faults, communication errors, or unintended supervisory commands.

Selection among multiple CC–CV control boards is performed using relay modules controlled via Modbus RTU communication. Based on the decoded CANopen identifier, the supervisory controller activates the corresponding relay channel, physically connecting the selected CC–CV board to the programmable Delta charger output. At any given time, only one relay path is allowed to be active, which guarantees mutual exclusivity among charging profiles, prevents conflicting configurations, and provides inherent electrical isolation between profiles.

During experimental operation, the system behavior was observed to remain stable under normal connection sequences, with charging activation permitted only after successful identifier validation and relay configuration. Any unexpected communication interruption results in the system remaining in a non-energized state, consistent with the fail-safe design principles described in Section 2.

The following simplified equations describe the conceptual CC–CV charging behavior used to illustrate the control logic rather than a detailed electrochemical battery model.

Once the appropriate CC–CV board is selected, the charging process follows the conventional CC–CV strategy. During the constant-current phase, the charging current is regulated to a predefined level I_{CC}, while the battery voltage increases, which can be expressed as

$$I(t) = I_{cc}, \text{ for } V(t) < V_{cv} \quad (1)$$

https://doi.org/10.3390/en19051310

where $I(t)$ and $V(t)$ denote the instantaneous charging current and battery terminal voltage, respectively. Under this condition, the voltage rise can be approximated by

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{I_{cc}}{C_{eq}} \tag{2}$$

with C_{eq} representing the equivalent battery capacitance.

When the battery voltage reaches the predefined threshold V_{CV}, the control loop transitions to constant-voltage operation, maintaining

$$V(t) = V_{cv}, \text{ for } t \geq t_{cv} \tag{3}$$

During this phase, the charging current naturally decays according to the battery's internal characteristics, which can be approximated as

$$I(t) = \frac{V_{cv} - V_{oc}}{R_{\text{int}}} \tag{4}$$

where $V_{OC}(t)$ is the open-circuit voltage and R_{int} is the internal resistance of the battery. To ensure safe termination of the charging process, a cutoff condition is enforced such that

$$I(t) \leq I_{cutoff} \tag{5}$$

at which point the charger output is disabled. All parameters I_{CC}, V_{CV}, and I_{cutoff} are defined exclusively by the selected hardware CC–CV board and remain invariant throughout the charging process.

By enforcing charging parameters through CANopen identifier mapping and hardware-level CC–CV profile selection, the proposed system achieves deterministic charging behavior, predictable charging trajectories, and enhanced robustness against software faults or network disturbances. This approach is particularly important in charging systems supporting heterogeneous battery configurations, where incorrect parameter selection may lead to unsafe operating conditions, as widely reported in the literature [61]. The charger-side CANopen frame validation and relay-based profile selection logic are detailed in Appendix A.3.

3.3. *Supervisory Control and Profile Routing Using NodeRED on redPLC*

High-level supervisory control is implemented using NodeRED running on the redPLC, which serves as the central industrial controller and protocol gateway of the proposed charging system [62,63]. This supervisory layer decouples low-level CANopen communication, handled by the ESP32-based embedded controllers, from high-level orchestration, state management, and system-level supervision executed on the redPLC. Such separation improves modularity, maintainability, and operational robustness.

At the charger side, a local status display provides real-time visualization of the detected CANopen identifier and the corresponding charging profile parameters, allowing immediate verification of correct profile selection before and during operation. The implementation details of this charger-side visualization interface are provided in Appendix A.4. After successful decoding and validation of the CANopen message, the charger-side controller forwards the extracted identification and associated parameters to the supervisory layer via the MQTT protocol. The data are formatted as structured JSON messages and published to predefined MQTT topics subscribed to by the NodeRED-based controller, as detailed in Appendix A.5.

In addition, the supervisory layer enables synchronized observation of charging states and communication events, ensuring that profile selection decisions and relay actions

remain fully traceable during operation. The integration of monitoring and control through a unified platform simplifies system diagnostics and supports systematic verification of experimental outcomes. This arrangement also allows seamless correlation between measured electrical parameters and control events, providing deeper insight into system behavior under different charging conditions. Such capabilities enhance confidence in the operational reliability of the proposed architecture and facilitate future extensions toward larger-scale deployments.

On the supervisory side, NodeRED functions as the central orchestration layer that receives, parses, normalizes, and dispatches incoming MQTT messages to the appropriate control logic blocks. A dedicated function node decomposes each received message into a compact internal representation containing the charging profile identifier, voltage reference, and current limit. This normalization and parsing process is described in Appendix A.6. As illustrated in Figure 4, the supervisory control logic routes each validated request through mutually exclusive logic branches corresponding to predefined charging profiles (0x500, 0x600, 0x700, and 0x800), ensuring deterministic profile routing through explicit interlock mechanisms.

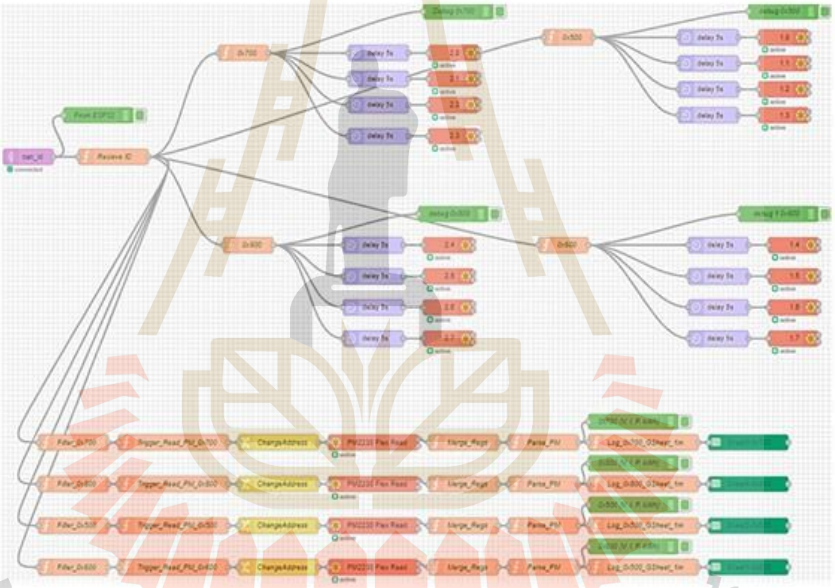


Figure 4. Overview of the NodeRED-based supervisory control flow for CAN ID parsing, charging profile routing, relay actuation via Modbus RTU, and integrated data acquisition and logging.

Once a charging profile is selected, NodeRED issues a predefined sequence of Modbus RTU commands to configure the relay outputs responsible for CC–CV board selection. A short intentional delay is introduced to mitigate relay contact bounce, inrush current, and transient misconfiguration effects. After relay switching is completed, the system transitions into a stable charging state, enabling the charger power stage. This hybrid supervisory–hardware control structure preserves flexibility at the supervisory level while guaranteeing deterministic and fail-safe charging behavior through hardware-enforced parameter selection.

https://doi.org/10.3390/en19051310

3.4. Industrial Communication Infrastructure via Modbus RTU and redPLC

Industrial communication within the charging cabinet is implemented using Modbus RTU over an RS-485 fieldbus, with the redPLC acting as the central master controller and protocol gateway [64,65]. All field devices are connected to a common multidrop bus and addressed using unique slave identifiers, as summarized in Table 4 in Section 2. This architecture enables deterministic and reliable communication suitable for industrial charging environments.

In the proposed implementation, two relay control modules are configured as Slave ID 1 and Slave ID 2, respectively. Both relay modules operate using a serial communication configuration of 9600 bps baud rate, 8 data bits, no parity, and one stop bit. These relay modules are responsible for selecting the appropriate CC–CV control board, thereby directly determining the physical charging path and enforcing hardware-level charging configuration.

For electrical parameter measurement, a PZEM-017 DC energy meter is configured as Slave ID 5 and operates using the same serial communication parameters. Additionally, a PM2230 AC power meter is configured as Slave ID 100 to measure input-side electrical quantities. The redPLC periodically polls all connected slave devices according to a predefined and deterministic scheduling cycle, issuing write commands to the relay modules and read commands to the measurement instruments.

This master–slave polling mechanism ensures collision-free bus access, predictable communication timing, and reliable data acquisition. By employing the redPLC as both an industrial controller and a protocol gateway, the proposed system supports scalable integration of additional field devices while maintaining strict real-time operation and deterministic system behavior, which are essential requirements for industrial-grade charging infrastructures [66].

The present experimental validation focuses on demonstrating stable operation and correct profile enforcement within the tested voltage and current ranges. Extended stress testing, large-scale fleet deployment evaluation, and long-term reliability assessment are outside the scope of this study but can be supported in future work due to the modular architecture of the proposed system.

3.5. Electrical Parameter Acquisition and Data Logging

Electrical parameters are acquired independently from both the AC input side and the DC output side of the charging system to support operational monitoring and experimental validation [67]. This dual-side measurement architecture enables cross-validation of electrical data and provides detailed insight into power conversion efficiency, charging dynamics, and overall system behavior.

On the DC side, voltage, current, instantaneous power, and accumulated energy are measured directly at the battery interface using a PZEM-017 DC energy meter configured as Modbus Slave ID 5, as summarized in Table 4 in Section 2. As illustrated in Figure 5, the redPLC periodically polls the PZEM-017 via Modbus RTU at a fixed sampling interval. The retrieved register values are parsed and forwarded to the supervisory layer, where they are processed and stored in a time-series database for subsequent analysis.

Within the supervisory system, the acquired voltage, current, power, and energy measurements are normalized and time-stamped using dedicated NodeRED function nodes before being routed to distinct InfluxDB buckets corresponding to each charging profile (24 V 5 A, 48 V 5 A, 60 V 5 A, and 72 V 15 A). This structured data separation enables direct performance comparison among different charging configurations and supports long-term trend analysis of charging behavior and system efficiency.

https://doi.org/10.3390/en19051310

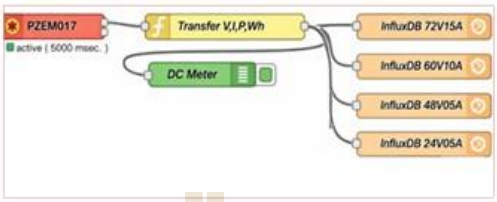


Figure 5. NodeRED flow for DC-side measurement acquisition using the PZEM-017 module and direct data forwarding to the InfluxDB time-series database for real-time monitoring and visualization.

In parallel, on the AC input side, voltage, current, active power, and accumulated energy are measured using a PM2230 industrial power meter configured as Modbus Slave ID 100. All AC-side measurement data are continuously logged to support long-term monitoring of charging sessions, performance evaluation, and cost estimation. Such dual-side measurements and logging architectures are commonly employed to assess charger performance and system efficiency under practical operating conditions [68]. The complete DC-side measurement acquisition and data forwarding pipeline is implemented using the MQTT and NodeRED-based data path detailed in Appendix A.7.

3.6. Electrical Parameter Acquisition and Data Logging

Real-time monitoring and long-term data management of the charging process are implemented using a time-series database and dashboard-based visualization architecture [69,70]. In the proposed system, all DC-side measurement data are written directly to the InfluxDB time-series database without passing through additional middleware layers. This direct data ingestion approach simplifies the overall data pipeline, reduces system complexity, and minimizes potential points of failure.

Figure 6 illustrates an example configuration of the Grafana data source connected to the InfluxDB database. Grafana accesses the database directly using consistent organization, bucket, and authentication token settings. This configuration enables reliable continuous streaming of measurement data for real-time visualization while simultaneously supporting historical data queries for post-process analysis and performance evaluation. The monitoring environment supports verification of charging stability, correctness of profile routing, and temporal consistency of measured electrical parameters throughout the experimental process.

From an architectural perspective, the direct coupling between the measurement layer and the time-series database establishes a clear separation between the control plane and the monitoring plane. The control logic responsible for charging profile selection and hardware actuation operates independently from the data acquisition, storage, and visualization pipeline. Such separation improves overall system robustness and prevents monitoring-related software faults from propagating into safety-critical charging operations [71].

Through this architecture, both real-time and historical trends of voltage, current, power, and accumulated energy can be monitored with high temporal resolution. This capability supports diagnostic analysis, performance evaluation, anomaly detection, and long-term experimental observation of the proposed charging system, which are essential requirements for industrial-grade and safety-oriented charging infrastructures.

https://doi.org/10.3390/en19051310

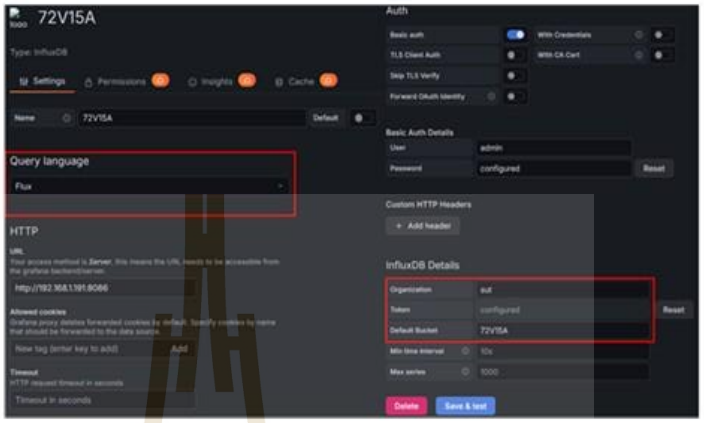


Figure 6. Configuration of the Grafana data source connected to the InfluxDB time-series database for real-time visualization of DC-side charging parameters, including voltage, current, power, and accumulated energy.

4. Experimental Results and Performance Evaluation

This section presents the experimental results and system-level performance evaluation of the proposed charging architecture implemented on an electric all-terrain vehicle (ATV) charging system. The experiments are designed to validate the operational correctness, deterministic behavior, and safety-oriented charging characteristics enabled by the identifier-driven charging profile selection and hardware-enforced CC–CV control architecture.

Rather than focusing on maximum power capability, the objective of this experimental evaluation is to verify the correctness and repeatability of charging behavior under realistic operating conditions, including automatic battery identification, profile routing, CC–CV charging transitions, and energy measurement accuracy. The results demonstrate that the proposed architecture provides a robust and energy-consistent charging framework suitable for industrial and fleet-oriented electric vehicle applications.

4.1. Experimental Setup and Test Conditions

The experimental validation is conducted using a complete electric ATV charging system incorporating the hardware and software architecture described in Section 3. The system consists of ESP32-based CANopen communication units on both the vehicle and charger sides, a redPLC executing supervisory control logic via NodeRED, hardware-enforced CC–CV control boards selected through relay actuation, and Modbus RTU–based measurement and control devices.

On the DC output side, charging voltage, current, instantaneous power, and accumulated energy are measured using a PZEM-017 DC energy meter. On the AC input side, voltage, current, active power, and energy consumption are monitored using a PM2230 industrial power meter. All measurement data are continuously logged to an InfluxDB time-series database and visualized in real time through Grafana dashboards.

Experiments are performed using an electric ATV equipped with lithium-based battery configurations corresponding to predefined charging profiles (24 V 5 A, 48 V 5 A, 60 V 5 A, and 72 V 15 A). For each charging session, the vehicle-side controller broadcasts its CANopen identifier upon physical connection, enabling automatic selection of the

https://doi.org/10.3390/en19051310

appropriate charging profile without manual intervention. Each session is recorded from the initiation of charging until completion of the CC–CV process.

4.2. Verification of Automatic Charging Profile Selection

This experiment verifies the correctness and determinism of the automatic charging profile selection mechanism based on CANopen identifier detection and supervisory control routing. When the vehicle is connected, the vehicle-side ESP32 broadcasts a predefined CANopen identifier representing the associated battery configuration. The charger-side controller validates the received identifier and forwards it to the supervisory layer for routing and actuation.

Figure 7 illustrates the runtime execution of the NodeRED-based supervisory control flow during a representative charging session. The detected CANopen identifier activates exactly one charging profile branch corresponding to the assigned configuration, while all other branches remain inactive. This mutually exclusive routing behavior ensures that only one CC–CV charging path is enabled at any given time.

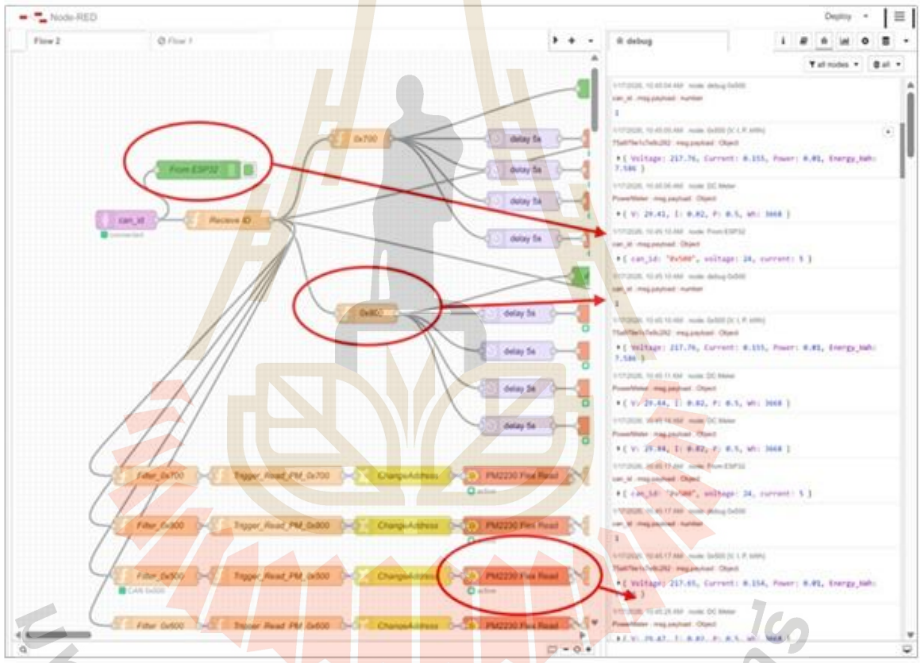


Figure 7. Runtime screenshot of the NodeRED supervisory control flow showing CAN ID–based routing and mutually exclusive charging profile selection. The highlighted path and debug messages confirm that the system correctly activates the charging profile corresponding to the detected battery configuration (CAN ID 0x800 in this example).

After profile selection, the supervisory controller issues a deterministic sequence of Modbus RTU commands to configure the relay outputs, physically connecting the appropriate CC–CV control board to the charger output. No incorrect profile activation, ambiguous routing, or conflicting relay states were observed throughout repeated plug-in and unplug cycles, confirming reliable and repeatable automatic charging profile selection.

https://doi.org/10.3390/en19051310

4.3. Real-Time CC–CV Charging Behavior and Visualization

Figures 8 and 9 present the real-time charging behavior of the proposed system under a representative 72 V 15 A charging configuration, visualized using the native InfluxDB query interface and the Grafana dashboard, respectively. This charging profile is selected as the representative case because it clearly demonstrates the complete constant-current to constant-voltage (CC–CV) transition under stable operating conditions.

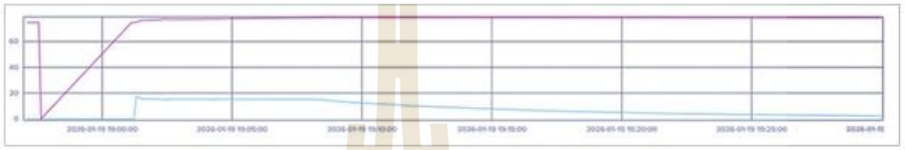


Figure 8. Real-time voltage and current data of the 72 V 15 A charging profile visualized directly using the native InfluxDB query interface. The purple curve represents the battery terminal voltage, while the blue curve denotes the charging current. Although the data are accurately recorded, the visualization is mainly intended for data inspection rather than operator-oriented monitoring.

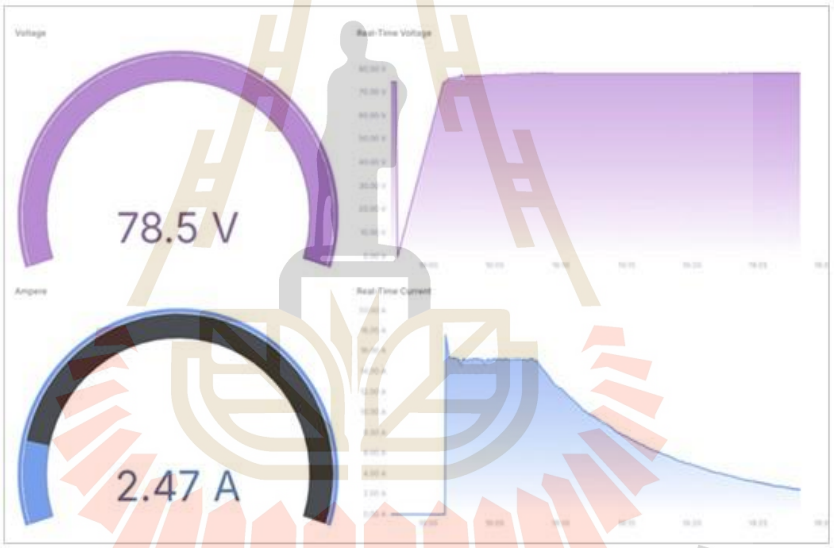


Figure 9. Real-time CC–CV charging profile of the 72 V, 15 A NMC configuration visualized using Grafana. The upper plots show the voltage evolution, while the lower plots show the current behavior. The transition from constant-current (CC) to constant-voltage (CV) operation is clearly observable.

Figure 8 shows the voltage and current waveforms plotted directly from the InfluxDB time-series database. Although this interface provides accurate and comprehensive access to the recorded measurement data, it is primarily designed for data inspection and historical querying rather than intuitive real-time operational monitoring.

Figure 9 illustrates the same charging session visualized using the Grafana dashboard. The upper plots show the battery terminal voltage, while the lower plots depict the charging current. The transition from constant-current (CC) mode to constant-voltage (CV) mode is clearly observable, confirming that the charging process follows the intended CC–CV charging trajectory.

https://doi.org/10.3390/en19051310

From the charging behavior shown in Figure 9, the system initially operates in constant-current (CC) mode, regulating the output current at approximately 15 A while the battery voltage increases steadily. Once the voltage reaches the predefined threshold of approximately 78.5 V, the control mode transitions to constant voltage (CV). During this phase, the battery voltage remains nearly constant while the charging current gradually decreases, which is characteristic of lithium-based battery charging processes.

The smooth and stable CC–CV transition confirms the correctness of the hardware-enforced charging control strategy and demonstrates the stability of both voltage and current regulation loops. The absence of voltage overshoot, current oscillation, or abrupt mode switching indicates effective loop design and reliable hardware-level enforcement of charging parameters, which are critical for battery safety and long-term reliability.

Although only the 72 V 15 A charging profile is presented in the main text as the representative case, experimental results for the remaining configurations (24 V 5 A, 48 V 5 A, and 60 V 5 A) exhibit the same CC–CV characteristics. Additional real-time dashboard visualizations for these charging configurations are provided in Appendix B to demonstrate the generality of the proposed architecture across different voltage and current levels.

Voltage deviations remained within ±2%, while current deviations were within ±5% during steady-state operation. The deviation values were computed by comparing steady-state measurements recorded in InfluxDB against the predefined CC–CV reference settings over multiple charging sessions.

4.4. Power and Energy Analysis and Charging Session Logging

To evaluate energy transfer behavior and charging efficiency, instantaneous power and accumulated energy are analyzed using the time-series data collected during charging sessions. Figure 10 presents the real-time charging power and cumulative energy profiles visualized through the Grafana dashboard for the 72 V/15 A charging configuration.

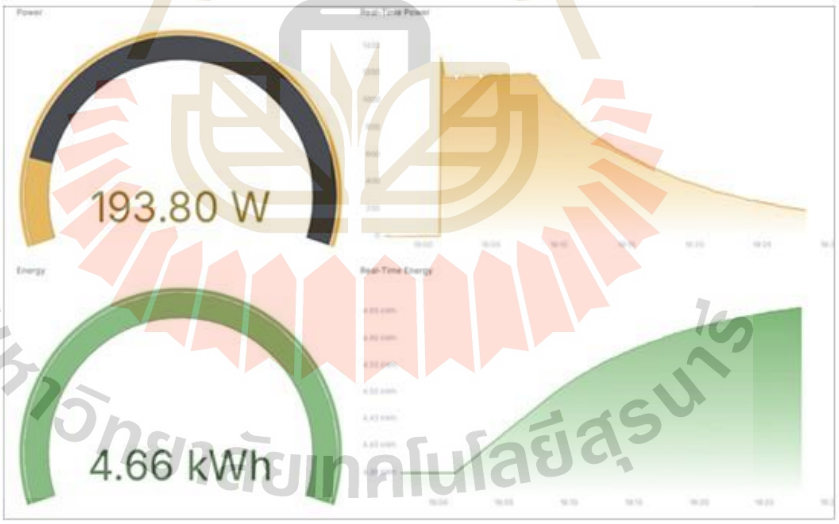


Figure 10. Power & Energy Dashboard (Grafana, 72 V 15 A).

The instantaneous power profile reflects the expected behavior of CC–CV charging, with higher power during the CC phase followed by a gradual decrease during the CV

phase. The accumulated energy curve increases monotonically throughout the charging session, confirming consistent energy transfer from the charger to the battery.

Figure 11 provides an example of the energy history and session-level logging extracted from the time-series database. These results demonstrate that the proposed system not only enforces charging parameters at the hardware level but also provides accurate and continuous measurement of energy delivery, which is essential for performance evaluation, traceability, and energy accounting.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	TimeStamp	Voltage [V]	Current [A]	Power [kW]	Energy [kWh]	TOU Type	Rate [THB]	Cost [THB]
674	2026-01-19 19:00:28	0	0	0	8.206	Idle	0	0
675	2026-01-19 19:01:31	212.72	5.233	0.94	8.211	On-peak	5.1135	0
676	2026-01-19 19:02:01	212.7	5.228	0.94	8.219	On-peak	5.1135	0
677	2026-01-19 19:02:36	212.89	5.234	0.94	8.228	On-peak	5.1135	0
678	2026-01-19 19:03:10	212.62	5.252	0.95	8.237	On-peak	5.1135	0
679	2026-01-19 19:04:03	212.73	5.267	0.95	8.25	On-peak	5.1135	0
680	2026-01-19 19:04:36	212.61	5.280	0.95	8.259	On-peak	5.1135	0
681	2026-01-19 19:05:17	212.6	5.295	0.96	8.27	On-peak	5.1135	0
682	2026-01-19 19:05:50	212.41	5.306	0.96	8.279	On-peak	5.1135	0
683	2026-01-19 19:06:56	212.48	5.326	0.96	8.297	On-peak	5.1135	0
684	2026-01-19 19:07:35	212.56	5.334	0.96	8.307	On-peak	5.1135	0
685	2026-01-19 19:08:06	212.64	5.339	0.97	8.315	On-peak	5.1135	0
686	2026-01-19 19:09:01	213.23	4.770	0.86	8.329	On-peak	5.1135	0
687	2026-01-19 19:09:46	213.67	4.366	0.79	8.34	On-peak	5.1135	0
688	2026-01-19 19:10:41	214.24	4.008	0.72	8.351	On-peak	5.1135	0

Figure 11. An example of the energy history (72 V 15 A).

4.5. Summary of Experimental Results and Practical Implications

The experimental results confirm that the proposed charging architecture achieves reliable automatic battery identification, deterministic charging profile selection, and stable CC–CV charging behavior across multiple battery configurations. The integration of CANopen-based identification, hardware-enforced CC–CV control, supervisory routing, and real-time measurement ensures that unsafe or conflicting charging configurations are structurally prevented.

From an energy-system perspective, the proposed architecture provides a clear separation between supervisory logic and safety-critical charging enforcement, ensuring that voltage and current limits are physically constrained by hardware rather than software logic alone. This approach significantly reduces the risk of misconfiguration, human error, and unintended charging behavior in environments where multiple battery types and voltage levels coexist.

Overall, the experimental validation demonstrates that the proposed system offers a robust and energy-consistent charging solution suitable for industrial electric vehicles, fleet charging environments, and other safety-critical charging infrastructures where deterministic behavior, repeatability, and accurate energy monitoring are essential.

No abnormal interruptions or unintended profile activations were observed during the experimental sessions, confirming stable operation. Future work will include long-duration testing and higher power validation to further assess system scalability.

4.6. System-Level Implications and Comparison with OCPP-Based Charging Architectures

Table 5 summarizes the key differences between the proposed identifier-driven, hardware-enforced charging architecture and conventional OCPP-based charging systems. While OCPP-based solutions primarily emphasize interoperability, backend coordination, and software-defined charging management, the proposed approach focuses on determinis-

https://doi.org/10.3390/en19051310

tic enforcement of voltage and current limits at the physical power interface. By embedding charging profile selection into CANopen identifiers and binding them to relay-selected CC–CV control boards, safety-critical charging parameters are guaranteed by hardware rather than network-dependent software control. This complementary architectural distinction is particularly relevant for industrial and fleet charging environments requiring reliable operation under heterogeneous battery configurations and stringent safety constraints [72–76]. The comparison highlights architectural trade-offs rather than performance superiority claims.

Table 5. Detailed Comparison between OCPP-Based Charging Architectures and the Proposed Hardware-Enforced Charging Framework.

Aspect	Conventional OCPP-Based Charging Architectures	Proposed Identifier-Driven Hardware-Enforced Architecture
System Layer Focus	Operates primarily at the application and backend layers, focusing on charging session control, billing, authorization, and interoperability between charging stations and central management systems via IP-based communication.	Operates at the execution and power-interface layer, focusing on deterministic enforcement of voltage and current limits directly at the charger hardware.
Charging Profile Definition	Charging profiles are dynamically generated, negotiated, or updated via backend software and transmitted over network protocols (e.g., OCPP JSON messages).	Charging profiles are predefined, physically configured, and selected via CANopen identifiers mapped to relay-selected CC–CV control boards.
Parameter Enforcement	Voltage and current constraints are enforced by software commands interpreted by the charger controller, making correct behavior dependent on communication integrity and firmware correctness.	Voltage and current constraints are enforced at the hardware level by preconfigured CC–CV boards, independent of software state or network availability.
Role of Communication Protocols	OCPP enables coordination, monitoring, and management but does not directly constrain the power electronics behavior at the physical interface.	CANopen identifiers act as deterministic selectors, while Modbus RTU performs physical routing and actuation without modifying charging parameters.
Safety-Critical Behavior	Safety depends on correct backend configuration, protocol compliance, and cybersecurity measures; misconfiguration or communication failure may propagate to the charging process.	Safety is guaranteed by design through hardware-level interlocking, preventing unsafe or conflicting charging configurations regardless of software faults.
Handling of Heterogeneous Batteries	Typically relies on backend databases and software logic to associate vehicle types with charging profiles.	Vehicle-side identifiers directly encode battery configuration, enabling immediate and unambiguous profile selection upon physical connection.
Experimental Validation Emphasis	Validation commonly focuses on interoperability, protocol compliance, and smart charging logic rather than physical CC–CV behavior.	Validation emphasizes real-time voltage, current, power, and energy measurements, demonstrating stable CC–CV transitions and deterministic charging trajectories.
Failure Mode Isolation	Software or network failures may affect charging correctness if not properly mitigated.	Hardware-enforced constraints isolate failure modes, preventing unsafe charging even under communication or supervisory control failures.

https://doi.org/10.3390/en19051310

In addition, the proposed architecture reduces reliance on continuous network connectivity and backend decision-making during active charging, thereby mitigating risks associated with communication delays, packet loss, or cybersecurity incidents that could otherwise affect software-controlled systems. The hardware-level binding between vehicle identification and charging configuration establishes a deterministic execution path, ensuring that voltage and current limits remain enforced regardless of supervisory network conditions. This characteristic is particularly beneficial in industrial environments where charging operations must continue safely under intermittent connectivity or degraded communication scenarios [72–76]. Furthermore, by separating high-level monitoring from low-level enforcement, the system maintains operational safety even if supervisory services experience temporary interruptions, since critical constraints are governed locally at the power interface. The explicit mapping between CANopen identifiers and relay-selected CC–CV boards also improves traceability and auditability of charging events, facilitating root-cause analysis and compliance verification in regulated deployments. From a system assurance perspective, enforcing limits through fixed hardware configurations simplifies validation and reduces the risk of unintended parameter changes introduced by software updates or configuration errors. While OCPP-based platforms provide flexibility for large-scale network coordination, billing integration, and remote management, the proposed approach prioritizes predictable behavior, fail-safe operation, and robustness against operational uncertainties. This architectural emphasis is especially relevant for fleet and industrial applications where heterogeneous battery systems coexist and strict safety margins must be preserved. Consequently, the comparison underscores complementary design philosophies, highlighting how hardware-enforced control can coexist with higher-level coordination frameworks to achieve both safety and operational efficiency in practical deployments.

Unlike OCPP-based architectures that primarily address interoperability and backend coordination, the proposed system introduces a hardware-enforced execution layer where charging safety, correctness, and determinism are guaranteed at the physical power interface. This complementary design is particularly suitable for industrial and fleet charging infrastructures where heterogeneous battery configurations, unattended operation, and strict safety requirements are critical.

5. Conclusions and Future Work

This study presented an identifier-driven and hardware-enforced charging architecture designed to ensure safe, deterministic, and energy-consistent operation for electric vehicles with heterogeneous battery configurations. By binding CANopen-based vehicle identification directly to relay-selected fixed CC–CV charging paths, the proposed system enforces voltage and current limits at the physical power interface rather than through software-defined negotiation. Experimental validation demonstrated stable CC–CV charging behavior, smooth current–voltage transitions, accurate electrical parameter acquisition, and reliable energy logging across multiple voltage levels. From an energy systems perspective, this approach structurally prevents unsafe power transfer, minimizes configuration-induced losses or instability, and provides a robust charging framework well suited for industrial, fleet-based, and safety-critical electric vehicle applications where repeatability and correctness of energy delivery are paramount.

While the experimental validation demonstrates stable and deterministic operation under representative conditions, the current study is conducted at moderate power levels and on a prototype-scale deployment. Further validation under higher power ratings and large-scale multi-charger environments remains an important direction for future investigation.

https://doi.org/10.3390/en19051310

Looking forward, the proposed architecture provides a scalable foundation for future energy-oriented charging infrastructures. Ongoing and future work will focus on extending the system to higher power levels and broader battery voltage ranges while preserving hardware-level enforcement of energy constraints. Further integration with battery management systems will enable health-aware and energy-optimized charging strategies, while advanced analysis of time-series power and energy data will support long-term performance assessment, degradation monitoring, and system-level optimization. These developments aim to position the proposed charging framework as a practical and extensible execution layer for next-generation energy-aware charging systems in connected, autonomous, and industrial electric vehicle ecosystems.

Author Contributions: Conceptualization, N.D. and U.L.; methodology, N.D.; software, N.D.; validation, N.D., C.S. and U.L.; formal analysis, N.D.; investigation, N.D.; resources, N.D.; data curation, N.D.; writing—original draft preparation, N.D. and S.N.; writing—review and editing, N.D.; visualization, N.D.; supervision, U.L.; project administration, N.D. and U.L.; funding acquisition, S.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand, under the Student Fundamental Research Fund for Universities, Grant No. IRD-thesis-1.

Data Availability Statement: The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request. The data are not publicly available due to their use as part of an ongoing research project and to prevent potential misuse of system-level configuration details.

Acknowledgments: The authors would like to thank the Suranaree University of Technology, Faculty of Engineering, for their support in terms of budget, equipment, and technical guidance for the thesis, as well as for their valuable advice and close supervision of this work. The authors would also like to express their sincere gratitude to Cherdchai Corporation Co., Ltd. for providing industrial insights and practical guidance toward the future development of large-scale charging stations for airport baggage tractor and ground support vehicle applications.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

ATV	All-Terrain Vehicle
EV	Electric Vehicle
CANopen	Controller Area Network Open Protocol
CC–CV	Constant-Current/Constant-Voltage

Appendix A. Vehicle–Charger CANopen Communication Layer

This appendix provides implementation-level details to support reproducibility and to clarify how deterministic profile selection and hardware-enforced safety mechanisms are realized in practice. The included code excerpts illustrate representative configuration, communication, and validation logic used during experimental validation, while the charging behavior itself remains governed by hardware constraints described in the main manuscript.

https://doi.org/10.3390/en19051310

Looking forward, the proposed architecture provides a scalable foundation for future energy-oriented charging infrastructures. Ongoing and future work will focus on extending the system to higher power levels and broader battery voltage ranges while preserving hardware-level enforcement of energy constraints. Further integration with battery management systems will enable health-aware and energy-optimized charging strategies, while advanced analysis of time-series power and energy data will support long-term performance assessment, degradation monitoring, and system-level optimization. These developments aim to position the proposed charging framework as a practical and extensible execution layer for next-generation energy-aware charging systems in connected, autonomous, and industrial electric vehicle ecosystems.

Author Contributions: Conceptualization, N.D. and U.L.; methodology, N.D.; software, N.D.; validation, N.D., C.S. and U.L.; formal analysis, N.D.; investigation, N.D.; resources, N.D.; data curation, N.D.; writing—original draft preparation, N.D. and S.N.; writing—review and editing, N.D.; visualization, N.D.; supervision, U.L.; project administration, N.D. and U.L.; funding acquisition, S.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand, under the Student Fundamental Research Fund for Universities, Grant No. IRD-thesis-1.

Data Availability Statement: The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request. The data are not publicly available due to their use as part of an ongoing research project and to prevent potential misuse of system-level configuration details.

Acknowledgments: The authors would like to thank the Suranaree University of Technology, Faculty of Engineering, for their support in terms of budget, equipment, and technical guidance for the thesis, as well as for their valuable advice and close supervision of this work. The authors would also like to express their sincere gratitude to Cherdchai Corporation Co., Ltd. for providing industrial insights and practical guidance toward the future development of large-scale charging stations for airport baggage tractor and ground support vehicle applications.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

ATV	All-Terrain Vehicle
EV	Electric Vehicle
CANopen	Controller Area Network Open Protocol
CC–CV	Constant-Current/Constant-Voltage

Appendix A. Vehicle–Charger CANopen Communication Layer

This appendix provides implementation-level details to support reproducibility and to clarify how deterministic profile selection and hardware-enforced safety mechanisms are realized in practice. The included code excerpts illustrate representative configuration, communication, and validation logic used during experimental validation, while the charging behavior itself remains governed by hardware constraints described in the main manuscript.

https://doi.org/10.3390/en19051310

Appendix A.1. Vehicle-Side Configuration Encoding and CANopen Identification

On the vehicle side, the ESP32-based embedded node is responsible for encoding the battery configuration parameters and transmitting the corresponding identification information to the charging cabinet via the CANopen communication layer over the CAN bus. The nominal battery voltage and current limits are selected using physical DIP switch settings and mapped to predefined discrete levels. This hardware-based parameter selection mechanism ensures that only validated and predefined charging profiles can be generated, eliminating software ambiguity and reducing the risk of misconfiguration in automated charging environments. No runtime voltage or current parameters are written or negotiated over the communication interface.

Each vehicle is uniquely identified by a predefined CANopen identifier (CAN ID), which is automatically assigned by the ESP32 controller during system initialization based on its internal chip identifier. In the present implementation, four CANopen identifiers (0x500, 0x600, 0x700, and 0x800) are used to represent different vehicle or battery configurations. This identifier is subsequently used by the charger-side supervisory system to select the corresponding charging profile. The CANopen identifier serves solely as a profile selector rather than a command-based parameter update mechanism.

By binding the battery configuration and charging profile information to a hardware-defined CANopen identifier, the proposed approach enables immediate and unambiguous vehicle and battery identification upon physical connection, without requiring any manual software configuration or negotiation process. This design choice enhances safety, repeatability, and deterministic behavior, and is particularly suitable for unattended and automated operation in connected charging infrastructures. The presented configuration logic reflects the experimental prototype and is intended to demonstrate the feasibility of identifier-based parameter enforcement rather than prescribe a production-ready implementation. Additional validation layers, such as redundancy checks and extended diagnostics, can be incorporated in larger-scale deployments.

Box A1. Presents the vehicle-side logic used to encode the predefined voltage and current settings into a CANopen identifier based on the physical configuration.

```
#define S1 25
#define S2 26
#define S3 27
#define S4 14
#define S5 12
#define S6 13
int readVoltageSetting() {
int b1 = digitalRead(S1);
int b2 = digitalRead(S2);
int b3 = digitalRead(S3);
int val = (b1 << 2) | (b2 << 1) | b3;
switch (val) {
case 0b000: return 12;
case 0b001: return 24;
case 0b010: return 36;
case 0b011: return 48;
case 0b100: return 60;
case 0b101: return 72;
case 0b110: return 84;
case 0b111: return 100;
default: return −1;
}
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Box A1. *Cont.*

```
int readCurrentSetting() {
int b4 = digitalRead(S4);
int b5 = digitalRead(S5);
int b6 = digitalRead(S6);
int val = (b4 << 2) | (b5 << 1) | b6;
switch (val) {
case 0b000: return 5;
case 0b001: return 10;
case 0b010: return 15;
case 0b011: return 20;
case 0b100: return 25;
default: return −1;
}
}
// CANopen ID assignment based on ESP32 chip ID
uint64_t chipID; uint32_t can_id; chipID = ESP.getEfuseMac();
if (chipID == 0xF4D1B21AD6B8) {
can_id = 0x500;
} else if (chipID == 0x1CB2F8BD9E7C) {
can_id = 0x600;
} else if (chipID == 0xC0EA9B9EF0C8) {
can_id = 0x700;
} else if (chipID == 0x48BDF1BD9E7C) {
can_id = 0x800;
} else {
can_id = 0x000;
}
```

Appendix A.2. Vehicle-Side CANopen Frame Packing and Transmission

After determining the voltage and current configuration, the vehicle-side ESP32 packages the selected charging profile information into a fixed-format CANopen data frame. The CANopen identifier is used as the primary means of vehicle and battery identification, while the data payload provides additional consistency information for charger-side validation. These values are not interpreted as runtime control commands but are used for identification consistency and validation purposes only.

The CANopen frame is transmitted periodically using the ESP32 TWAI (Two-Wire Automotive Interface) over the CAN physical layer at a bit rate of 125 kbps. This lightweight and deterministic communication mechanism ensures that the charger-side controller always receives a valid and up-to-date identification frame prior to any power-stage activation. Periodic broadcasting, rather than event-driven transmission, improves robustness against transient communication disturbances and guarantees predictable system behavior during automated charging operations.

The use of fixed-format frame packing and periodic transmission aligns with the deterministic design philosophy of the proposed charging system, where charging parameters are strictly enforced at the hardware level and communication is used solely for identification and verification. This approach is particularly important in connected charging infrastructures, where reliable and unambiguous identification is a prerequisite for safe and unattended operation.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

https://doi.org/10.3390/en19051310

Box A2. Illustrates the low-level CANopen frame packing and periodic transmission procedure implemented on the vehicle-side controller.

```
float voltage = (float)readVoltageSetting();
float current = (float)readCurrentSetting();

twai_message_t tx_message;
tx_message.identifier = can_id;
tx_message.extd = 1;
tx_message.rtr = 0;
tx_message.data_length_code = 8;

// Pack voltage and current into CANopen payload
memcpy(&tx_message.data[0], &voltage, 4);
memcpy(&tx_message.data[4], &current, 4);

// Transmit CANopen frame
if (twai_transmit(&tx_message, pdMS_TO_TICKS(100)) == ESP_OK) {
Serial.print("Sent CAN ID: ");
Serial.println(can_id, HEX);
}
```

Appendix A.3. Charger-Side CANopen Reception and Identifier Validation

On the charger side, an ESP32-based CANopen interface continuously monitors the CAN bus and receives incoming frames transmitted by the vehicle-side controller. Each received frame is subjected to an initial validation process that checks both the payload length and the CANopen identifier. Only messages with a valid data format and one of the predefined CANopen identifiers corresponding to supported charging profiles are accepted for further processing.

Upon successful reception, the CANopen identifier is used to confirm the selected charging profile prior to any hardware-level action. Payload information contained in the received frame is parsed solely for identification consistency checking and charger-side validation purposes. These values are not used to dynamically configure charging parameters, which remain strictly enforced by the selected hardware CC–CV control board.

Any CANopen frame that does not satisfy the validation criteria is immediately discarded, and the charger output remains inhibited. This fail-safe filtering mechanism prevents unintended or unsafe charging operations and ensures that only explicitly authorized messages can propagate to the hardware selection and control layers.

The charger-side CANopen reception and validation logic is implemented in embedded firmware on the ESP32 controller. Box A3 provides the corresponding implementation code that realizes the identifier validation, payload checking, and fail-safe filtering mechanisms described above. The source code is included for completeness and reproducibility, while the charging behavior itself remains governed by hardware-enforced CC–CV constraints. The validation routine is designed to ensure that only correctly formatted and explicitly recognized messages are accepted, thereby preventing unintended activation of charging configurations due to corrupted frames or communication disturbances. This behavior supports fail-safe operation under realistic industrial communication conditions.

Box A3. Presents the charger-side CANopen frame reception and identifier validation logic implemented in the ESP32 firmware.

```
twai_message_t rx_message;
float rx_voltage, rx_ampere;
uint32_t rx_id = 0;
bool dataReceived = false;
```

https://doi.org/10.3390/en19051310

Box A3. *Cont.*

```
if (twai_receive(&rx_message, pdMS_TO_TICKS(100)) == ESP_OK) {
rx_id = rx_message.identifier;
if (rx_message.data_length_code == 8) {
if (rx_id == 0x500 || rx_id == 0x600 || rx_id == 0x700 || rx_id == 0x800) {
memcpy(&rx_voltage, &rx_message.data[0], 4);
memcpy(&rx_ampere, &rx_message.data[4], 4);
dataReceived = true;
} else {
dataReceived = false;
}
}
}
```

Appendix A.4. Charger-Side Status Display for CANopen-Based Vehicle Identification and Charging Parameter Monitoring

To facilitate system commissioning, debugging, and on-site verification, a local status display is implemented on the charger-side controller. This display provides real-time visualization of the detected CANopen identifier and the corresponding charging profile parameters, allowing operators and engineers to immediately verify correct profile selection prior to and during charging operation.

Specifically, the display presents the following information:

- The detected CANopen identifier (CAN ID) of the connected vehicle;
- The target charging voltage corresponding to the selected profile;
- The target or measured charging current associated with the active CC–CV configuration.

This human–machine interface serves as a lightweight diagnostic and monitoring tool during system setup, maintenance, and troubleshooting. By providing immediate visual confirmation of identifier-based profile selection, the display enhances operational confidence and supports verification that the CANopen-based identification and routing mechanism is functioning correctly before hardware-level enforcement and throughout the charging process.

Box A4. Shows an example implementation of the charger-side display update routine using an SSD1306 OLED module.

```
// Clear display and prepare for update
display.clearDisplay();                    // Clear screen
display.setTextSize(1);                    // Set text size
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setCursor(0, 0);                   // Set cursor to top left
// Display CAN ID
display.print("CAN ID: ");
display.println(can_id, HEX);
// Display voltage reference
display.print("Voltage V: ");
display.println(rx_voltage);
// Display current reference
display.print("Ampere A: ");
display.println(rx_ampere);
// Update display
display.display();
// Small delay for display refresh stability
delay(50);
```

https://doi.org/10.3390/en19051310

Appendix A.5. Charger-Side MQTT Forwarding of CANopen Identification and Charging Parameters

After successful decoding and validation of the CANopen message at the charger side, the extracted identification and associated charging parameters are forwarded to the supervisory control system using the MQTT protocol. The data are formatted as a structured JSON object containing the CANopen identifier, voltage reference, and current limit.

The formatted message is published to a predefined MQTT topic subscribed to by the NodeRED-based supervisory controller. This forwarding mechanism enables real-time supervisory monitoring and deterministic profile routing while preserving a clear separation between the low-level CANopen communication layer and the high-level supervisory control logic.

By decoupling charger-side embedded firmware from supervisory logic, the proposed architecture improves modularity and allows the control strategy to be extended or modified at the supervisory level without requiring firmware changes on the charger-side microcontroller. Due to space limitations, only the core functional components of the MQTT forwarding logic are presented.

Box A5. Illustrates the charger-side MQTT forwarding logic used to publish validated CANopen identification and charging parameters.

```
if (dataReceived) {
String payload = "{";
payload += "\"can_id\":\"0x" + String(rx_id, HEX) + "\",";
payload += "\"voltage\":" + String(rx_voltage) + ",";
payload += "\"current\":" + String(rx_ampere);
payload += "}";

if (client.publish(mqtt_topic, payload.c_str())) {
Serial.println("MQTT message sent: " + payload);
} else {
Serial.println("Failed to send MQTT message"); }
}
```

Appendix A.6. Supervisory-Side CANopen Message Parsing and Normalization in NodeRED

After the charger-side controller forwards the decoded CANopen data to the supervisory system via MQTT, NodeRED operates as the central orchestration layer responsible for receiving, parsing, and dispatching incoming messages to the appropriate control logic blocks. The received MQTT message is formatted as a JSON object containing three primary fields: the CANopen identifier (CAN ID), the requested voltage reference, and the requested current limit.

To simplify downstream processing and ensure deterministic routing, a dedicated NodeRED function node—referred to as the Receive ID node—is used to normalize the incoming message payload. This node extracts the relevant fields from the JSON object and maps them into a compact internal representation consisting of three variables:

- x: CANopen identifier (profile selector);
- y: requested voltage reference;
- z: requested current limit.

This normalized representation allows subsequent supervisory logic to remain independent of the original MQTT message format and enables the same processing pipeline to be reused across multiple charging profiles and multiple vehicles. Importantly, this parsing and normalization process does not modify charging parameters; it serves solely to support deterministic profile routing, validation, and supervisory coordination.

https://doi.org/10.3390/en19051310

Box A6. Shows the NodeRED function node implementation for CANopen message parsing and normalization.

```
msg.payload = {
x: msg.payload.can_id,
y: msg.payload.voltage,
z: msg.payload.current
};
return msg;
```

Appendix A.7. Charging Profile Selection and Relay Actuation via Modbus RTU

After the MQTT message has been received and decomposed into internal variables (x,y,z), as described in Section 3.3, the supervisory control layer selects the appropriate charging profile and initiates hardware configuration of the charger. This process is implemented in NodeRED by combining identifier-based routing logic with Modbus RTU–based relay actuation.

Specifically, the supervisory variable msg.payload.x, which represents the CANopen identifier of the connected vehicle, is evaluated by a set of dedicated function nodes corresponding to predefined charging profiles (0x500, 0x600, 0x700, and 0x800). Each function node performs a strict equality check. If the received CANopen identifier matches the assigned profile, the function output is asserted; otherwise, the message is discarded. This routing mechanism enforces mutual exclusivity among charging profiles and guarantees that only one charging configuration can be active at any given time.

Once a valid charging profile is selected, the corresponding trigger signal is forwarded to a predefined sequence of Modbus RTU write nodes that control the RS-485 relay modules. These relays are responsible for physically connecting the selected CC–CV control board and associated voltage and current configuration inside the charger. A short intentional delay (5 s) is introduced between relay actuation steps to mitigate inrush current, contact arcing, and transient instability during switching. The relay activation sequence is intentionally serialized and guarded by logical checks to avoid simultaneous switching or transient misconfiguration. This sequencing strategy reduces electrical stress and improves operational reliability during repeated profile transitions.

Through this mechanism, the system enforces hardware-level interlocking, ensuring that incorrect or conflicting charging configurations cannot be activated simultaneously. As a result, the abstract software-level selection of a charging profile based on the CANopen identifier is deterministically translated into a concrete hardware configuration via Modbus RTU. After relay actuation is completed, the system enters a stable charging state and proceeds with the measurement and monitoring phase of the charging process.

Box A7. Shows an example NodeRED routing function for the charging profile corresponding to CANopen identifier 0x500.

```
let can = msg.payload.x;
if (can == "0x500") {    // Change (0x600, 0x700, 0x800)
msg.payload = 1;     // trigger signal Relay-RS485
return msg;
}
// If not 0x500, block this path
return null;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

https://doi.org/10.3390/en19051310

Appendix B

In the main body of this paper, the experimental results focus on the 72 V 15 A charging configuration as a representative operating condition, where the charging behavior is visualized using a Grafana-based monitoring platform. To further demonstrate the generality and scalability of the proposed charging architecture, three additional charging configurations with different voltage and current ratings were evaluated using the same measurement, logging, and visualization pipeline based on InfluxDB and Grafana.

Figures A1–A3 present the Grafana-based time-series visualizations of voltage and current for the 24 V 5 A, 48 V 5 A, and 60 V 5 A charging systems, respectively. In all cases, the charging process consistently follows the expected constant-current–constant-voltage (CC–CV) profile. During the initial stage, the charging current remains approximately constant while the battery voltage gradually increases (CC mode). After the target voltage is reached, the system transitions smoothly to constant-voltage (CV) operation, during which the voltage is regulated and the charging current decreases progressively as the battery approaches full charge. These results confirm that the proposed CANopen–NodeRED–Modbus–InfluxDB–Grafana-based platform can be directly reused across different battery configurations without modification of the core control logic, while maintaining consistent energy monitoring and visualization behavior. These additional experiments demonstrate consistent behavior of the proposed architecture across multiple battery configurations, supporting its applicability beyond the representative case discussed in the main text.

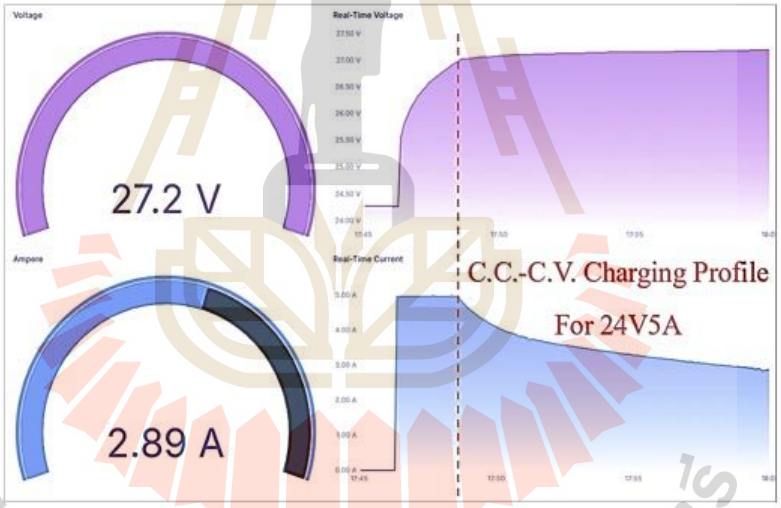


Figure A1. Grafana-based time-series visualization of voltage and current during the charging process for the 24 V 5 A configuration. The red dashed vertical line indicates the transition point from constant-current (CC) mode to constant-voltage (CV) mode.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

https://doi.org/10.3390/en19051310

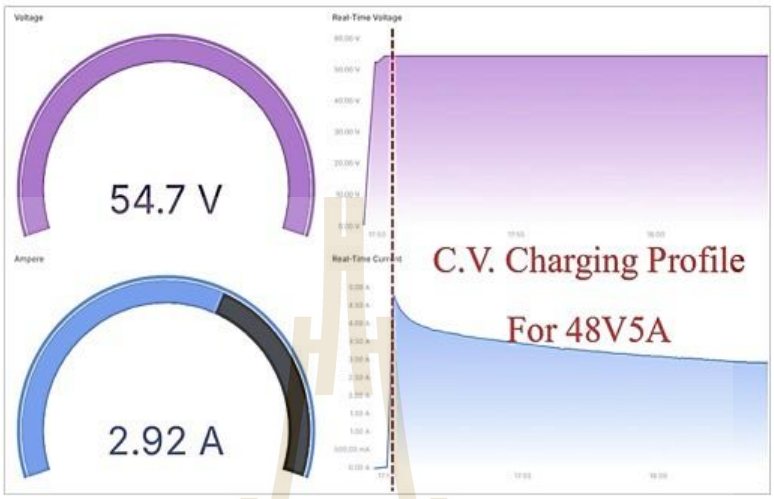


Figure A2. Grafana-based time-series visualization of voltage and current during the charging process for the 48 V 5 A configuration. The red dashed vertical line indicates the transition point from constant-current (CC) mode to constant-voltage (CV) mode.

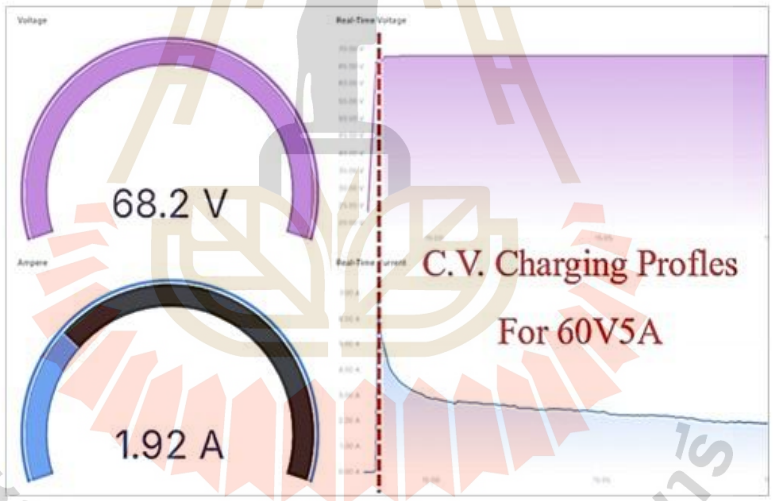


Figure A3. Grafana-based time-series visualization of voltage and current during the charging process for the 60 V 5 A configuration. The red dashed vertical line indicates the transition point from constant-current (CC) mode to constant-voltage (CV) mode.

References

1. Mateen, S.; Amir, M. Ultra-fast charging of electric vehicles: Power electronics converters, grid stability and optimal battery consideration in multi-energy systems. *Energy Rep.* **2023**, *9*, 1970–1988. [CrossRef]
2. Yenil, V.; Cetin, S. Load independent constant current and constant voltage control of LCC-series compensated wireless EV charger. *IEEE Trans. Power Electron.* **2022**, *37*, 8701–8712. [CrossRef]

https://doi.org/10.3390/en19051310

3. Dar, A.R.; Haque, A.; Khan, M.A.; Kurukuru, V.S.B.; Mehfuz, S. On-board chargers for electric vehicles: A comprehensive review of technology, challenges, and prospects. *Energies* **2024**, *17*, 4534. [CrossRef]
4. Zentani, A.; Almaktoof, A.; Kahn, M.T. A Comprehensive Review of Developments in Electric Vehicles Fast Charging Technology. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 4728. [CrossRef]
5. Bhosale, P.; Sujil, A.; Kumar, R.; Bansal, R.C. Electric vehicle charging infrastructure, standards, types, and its impact on grid: A review. *Electr. Power Compon. Syst.* **2024**, *52*, 253–271. [CrossRef]
6. Zeballos, M.; Ferragut, A.; Paganini, F. Proportional fairness for EV charging in overload. *IEEE Trans. Smart Grid* **2019**, *10*, 6792–6801. [CrossRef]
7. Rivera, S.; Goetz, S.; Kouro, S. Charging Infrastructure and Grid Integration for Electromobility. *Proc. IEEE* **2023**, *111*, 371–396. [CrossRef]
8. Rafi, M.A.H.; Bauman, J. A Comprehensive Review of DC Fast-Charging Stations with Energy Storage: Architectures, Power Converters, and Analysis. *IEEE Trans. Transp. Electrif.* **2021**, *7*, 345–368. [CrossRef]
9. Shahed, M.T.; Harun-ur Rashid, A.B.M. Battery charging technologies and standards for electric vehicles: State-of-the-art review, challenges, and future research prospects. *Energy Rep.* **2024**, *10*, 2212–2239. [CrossRef]
10. Kuperman, A.; Levy, U.; Goren, J.; Zafransky, A.; Savernin, A. Battery Charger for Electric Vehicle Traction Battery Switch Station. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2013**, *60*, 5391–5399. [CrossRef]
11. Shi, J.; Zeng, T.; Moura, S.J. Electric fleet charging management considering battery degradation and nonlinear charging profile. *Energy* **2023**, *283*, 129094. [CrossRef]
12. Maia, O.F.; Gärtner, N.; Stuckenschmidt, H. Data-driven smart charging for heterogeneous electric vehicle fleets. *Energy AI* **2020**, *1*, 100007. [CrossRef]
13. Kirchner, S.R. OCPP Interoperability: A Unified Future of Charging. *World Electr. Veh. J.* **2024**, *15*, 191. [CrossRef]
14. Hamdare, S.; Brown, D.J.; Cao, Y.; Aljaidi, M.; Kumar, S.; Alanazi, R.; Jugran, M.; Vyas, P.; Kaiwartya, O. A Novel Charging Management and Security Framework for the Electric Vehicle (EV) Ecosystem. *World Electr. Veh. J.* **2024**, *15*, 392. [CrossRef]
15. Rojas-Hernandez, I. Electric Vehicle Fleet control through OCPP deployment. 2022 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN), Panama City, Panama, 9–12 November 2022; pp. 1–5. [CrossRef]
16. Hamdare, S.; Brown, D.J.; Jha, D.N.; Aljaidi, M.; Cao, Y.; Kumar, S.; Kharel, R.; Jugran, M.; Kaiwartya, O. Cyber defense in OCPP for EV charging security risks. *Int. J. Inf. Secur.* **2025**, *24*, 134. [CrossRef]
17. Tanyıldız, H.; Şahin, C.B.; Dinler, Ö.B.; Migdady, H.; Saleem, K.; Smerat, A.; Gandomi, A.H.; Abualigah, L. Detection of cyber attacks in electric vehicle charging stations. *Sci. Rep.* **2025**, *15*, 92895. [CrossRef]
18. Santos, J.B.; Francisco, A.M.B.; Cabrita, C.; Monteiro, J.; Pacheco, A.; Cardoso, P.J.S. Development and Implementation of a Smart Charging System for Electric Vehicles Based on the ISO 15118 Standard. *Energies* **2024**, *17*, 3045. [CrossRef]
19. Motlagh, S.G.; Oladigbolu, J.; Li, L. A review on electric vehicle charging station operation considering market dynamics and grid interaction. *Appl. Energy* **2025**, *326*, 126058. [CrossRef]
20. Dharangaonkar, S.K.; Patil, S.A. Planning of Electric Vehicle Charging Infrastructure: A Review and a Conceptual Framework Based on Spatial and Predictive Analysis. *Int. J. Sustain. Dev. Plan.* **2025**, *20*, 2317–2330. [CrossRef]
21. Ferretti, F.; De Paola, A. Machine learning identification of Electric Vehicles from charging session data. *Energy AI* **2025**, *20*, 100502. [CrossRef]
22. Pavković, D.; Kasać, J.; Krznar, M.; Cipek, M. Adaptive constant-current/constant-voltage charging of a battery cell based on cell open-circuit voltage estimation. *World Electr. Veh. J.* **2023**, *14*, 155. [CrossRef]
23. Wu, X.; Hu, C.; Du, J.; Sun, J. Multistage CC-CV charge method for Li-ion battery. *Math. Probl. Eng.* **2015**, *1*, 294793. [CrossRef]
24. Wang, W.; Deng, J.; Chen, D.; Wang, Z.; Wang, S. A Novel Design Method of LCC-S Compensated Inductive Power Transfer System Combining Constant Current and Constant Voltage Mode via Frequency Switching. *IEEE Access* **2021**, *9*, 117244–117256. [CrossRef]
25. Nichols, K.M.; Roembke, R.A.; Adamczyk, P.G. Real-Time Motor Control Using a Raspberry Pi, ROS, and CANopen over EtherCAT, with Application to a Semi-Active Prosthetic Ankle. *Actuators* **2025**, *14*, 84. [CrossRef]
26. Santhosh Kumar, P.; Kamath, R.N.; Boyapati, P.; Josephson, P.J.; Natrayan, L.; Shadrach, F.D. IoT battery management system in electric vehicle based on LR parameter estimation and ORMeshNet gateway topology. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2022**, *53*, 102696. [CrossRef]
27. Riza, M.Y.; Aji, P.; Priyasta, D.; Rijanto, E.; Priandana, E.R.; Yusivar, F.; Nurdiana, E. A Design of Smart Charging Architecture for Battery Electric Vehicles. In *Proceedings of the 2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe 2023), Grenoble, France*; IEEE: New York, NY, USA, 2023. [CrossRef]
28. Lobato, E.; Prazeres, L.; Medeiros, I.; Araújo, F.; Rosário, D.; Cerqueira, E.; Tostes, M.; Bezerra, U.; Fonseca, W. A Monitoring System for Electric Vehicle Charging Stations: A Prototype in the Amazon. *Energies* **2022**, *16*, 152. [CrossRef]
29. Martins, J.A.; Rodrigues, J.M.F. Intelligent Monitoring Systems for Electric Vehicle Charging. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 2741. [CrossRef]

30. Mohamad Nizam, M.S.; Abdullah, E.; Hidayat, N.M.; Hashim, N.M.Z. Real-Time Energy Monitoring in Renewable EV Charging Stations: An ESP32-Based System Integrating Modbus, MQTT, and ESP-NOW Protocols. In *2024 IEEE 22nd Student Conference on Research and Development (SCOReD)*; IEEE: New York, NY, USA, 2024. [CrossRef]
31. Tayri, A. Grid Impacts of Electric Vehicle Charging: A Review of the Effects of High EV Penetration and Mitigation Strategies. *Energies* **2025**, *18*, 3807. [CrossRef]
32. Mansour, H.S.E.; Samir, M.; Elhady, B.; Maksoud, S.A. Wireless Charging Systems for Electric Vehicles: Review. *Green Energy Intell. Transp.* **2025**, 100371. [CrossRef]
33. Peserico, G.; Morato, A.; Tramarin, F.; Vitturi, S. Functional Safety Networks and Protocols in the Industrial Internet of Things: Integration of Safety and Reliability Features. *Sensors* **2021**, *21*, 6073. [CrossRef]
34. Yanpreechaset, C.; Donjaroennon, N.; Nuchkum, S.; Leeton, U. Development of an EV Battery Management Display with CANopen Communication. *World Electr. Veh. J.* **2025**, *16*, 375. [CrossRef]
35. Morrissey, P.; Weldon, P.; O'Mahony, M. Future standard and fast charging infrastructure planning: An analysis of electric vehicle charging behaviour. *Energy Policy* **2016**, *89*, 257–270. [CrossRef]
36. Acharige, S.S.G.; Haque, M.E.; Arif, M.T.; Hosseinzadeh, N.; Hasan, K.N.; Oo, A.M.T. Review of electric vehicle charging technologies, standards, architectures, and converter configurations. *IEEE Access* **2023**, *11*, 41218–41255. [CrossRef]
37. Khekert, E.V.; Malozyomov, B.V.; Klyuev, R.V.; Martyushev, N.V.; Konyukhov, V.Y.; Kukartsev, V.V.; Remezov, I.S. Battery Charging Simulation of a Passenger Electric Vehicle from a Traction Voltage Inverter with an Integrated Charger. *World Electr. Veh. J.* **2025**, *16*, 391. [CrossRef]
38. Johnson, J.; Berg, T.; Anderson, B.; Wright, B. Review of Electric Vehicle Charger Cybersecurity Vulnerabilities and Standard Protocols including ISO 15118 Plug-and-Charge. *Energies* **2022**, *15*, 3931. [CrossRef]
39. Chen, G.-J.; Wang, Y.-H.; Huang, Q.-Y.; Zhang, Z. Evaluation of Charging Methods for Lithium-Ion Batteries. *Electronics* **2023**, *12*, 4095. [CrossRef]
40. Ku, K.; Son, S.-B.; Gim, J.; Park, J.; Liang, Y.; Stark, A.; Lee, E.; Libera, J. Understanding the constant-voltage fast-charging process using a high-rate Ni-rich cathode material for lithium-ion batteries. *J. Mater. Chem. A* **2022**, *10*, 288–295. [CrossRef]
41. Li, W.; Yanyachi, A.; Xia, J.; Kuppan, S.; Zhou, J.; Wang, Y.; Li, Y.; Pianetta, P.; Zhao, K.; Mitlin, D.; et al. Mechanistic Considerations for Battery Charging Protocol Design. *Adv. Energy Mater.* **2025**, *16*, e04499. [CrossRef]
42. Dini, P.; Saponara, S.; Colicelli, A. Overview on Battery Charging Systems for Electric Vehicles: Architectures, Control Strategies, and Safety Considerations. *Electronics* **2023**, *12*, 4295. [CrossRef]
43. Bui, V.-T.; Dow, C.-R.; Huang, Y.-C.; Liu, P.; Thai, V.D. A CANopen-Based Gateway and Energy Monitoring System for Electric Bicycles. *Energies* **2020**, *13*, 3766. [CrossRef]
44. Urrea, C.; Morales, C.; Kern, J. Implementation of error detection and correction in the Modbus-RTU serial protocol. *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.* **2016**, *15*, 27–37. [CrossRef]
45. Yue, G. Design of Intelligent Monitoring and Control System Based on Modbus. In Proceedings of the 2020 5th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP), Chengdu, China, 13–15 November 2020; pp. 149–153. [CrossRef]
46. Găitan, V.G.; Zagan, I. Enhancing the Modbus Communication Protocol to Minimize Acquisition Times Based on an STM32-Embedded Device. *Mathematics* **2022**, *10*, 4686. [CrossRef]
47. Ungurean, I. Integrating Fieldbus and Data-Centric Middleware: An STM32 Modbus Master Gateway for DDS-Based IIoT Systems. *Technologies* **2025**, *13*, 526. [CrossRef]
48. Xu, Y.; Zhang, H.; Liu, J. *Research on Model Mapping Method Between MODBUS and IEC 61850*; SPIE: Eindhoven, The Netherlands, 2023; p. 125960N. [CrossRef]
49. You, W.; Ge, H. Design and Implementation of Modbus Protocol for Intelligent Building Security. In Proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT), Xi'an, China, 16–19 October 2019; pp. 420–423. [CrossRef]
50. Xylia, M.; Olsson, E.; Macura, B.; Nykvist, B. Estimating charging infrastructure demand for electric vehicles: A systematic review. *Energy Strategy Rev.* **2025**, *59*, 101753. [CrossRef]
51. Tole, S.; Wahono, T.; Jopri, M.H. Monitoring the Charging of a Lithium-Ion Battery from a Photovoltaic Source Using a PZEM-017 Sensor via the ESP32-Based Internet of Things. In Proceedings of the 2025 12th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), Semarang, Indonesia, 25–26 September 2025. [CrossRef]
52. Wu, L. The Usage of Big Data in Electric Vehicle Charging. *Energies* **2025**, *18*, 5066. [CrossRef]
53. Burgio, A.; Cimmino, D.; Nappo, A.; Smarrazzo, L.; Donatiello, G. An IoT-Based Solution for Monitoring and Controlling Battery Energy Storage Systems at Residential and Commercial Levels. *Energies* **2023**, *16*, 3140. [CrossRef]
54. Rachid, A.; El Fadil, H.; Gaouzi, K.; Rachid, K.; Lassioui, A.; El Idrissi, Z.; Koundi, M. Electric Vehicle Charging Systems: Comprehensive Review. *Energies* **2023**, *16*, 255. [CrossRef]
55. Ucer, E.; Kisacikoglu, M. Development of a Hardware-in-the-Loop Testbed for a Decentralized, Data-Driven Electric Vehicle Charging Control Algorithm. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **2024**, *60*, 6622–6633. [CrossRef]

https://doi.org/10.3390/en19051310

56. Hildermeier, J.; Kolokathis, C.; Rosenow, J.; Hogan, M.; Wiese, C.; Jahn, A. Smart EV Charging: A Global Review of Promising Practices. *World Electr. Veh. J.* **2019**, *10*, 80. [CrossRef]
57. Torregrossa, D.; Le Boudec, J.-Y.; Paolone, M. Model-free computation of ultra-short-term prediction intervals of solar irradiance. *Sol. Energy* **2016**, *124*, 57–67. [CrossRef]
58. Rudnik, R.; Wang, C.; Reyes-Chamorro, L.; Achara, J.; Le Boudec, J.-Y.; Paolone, M. Real-time control of an electric-vehicle charging station while tracking an aggregated power-setpoint. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **2020**, *56*, 5750–5761. [CrossRef]
59. Nutkani, I.; Toole, H.; Fernando, N.; Andrew, L.P.C. Impact of EV charging on electrical distribution networks: A comprehensive review. *IET Smart Grid* **2024**, *7*, 485–502. [CrossRef]
60. Hu, X.; Li, S.; Peng, H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *J. Power Sources* **2012**, *198*, 359–367. [CrossRef]
61. Wen, R.C.; Han, S.R.; Liang, L. Design of Electric Vehicle Battery Management System Based on CAN Bus. *Adv. Mater. Res.* **2012**, *546–547*, 272–277. [CrossRef]
62. Nitulescu, I.-V.; Korodi, A. Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions. *IoT* **2020**, *1*, 76–91. [CrossRef]
63. Omidi, S.A.; Baig, M.J.A.; Iqbal, M.T. Design and Implementation of Node-Red Based Open-Source SCADA Architecture for a Hybrid Power System. *Energies* **2023**, *16*, 2092. [CrossRef]
64. Găitan, V.G.; Zagan, I.; Găitan, N.C. Modbus RTU Protocol Timing Evaluation for Scattered Holding Register Read and ModbusE-Related Implementation. *Processes* **2025**, *13*, 367. [CrossRef]
65. Sun, C.; Wang, L.; Zheng, J. Design and Development of Modbus/MQTT Gateway for Industrial IoT Applications. In Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Automation, Hangzhou, China, 22–24 November 2019. [CrossRef]
66. Sánchez Ocaña, W.E.; Navas-Castellanos, A.; Salazar-Jácome, E.; Chancusig-Muso, C. Validation of the Functionality of an Industrial Network Based on RS-485 and Industrial Ethernet Protocols for Multivariable Processes. *Int. Rev. Autom. Control. (IREACO)* **2023**, *16*, 162–170. [CrossRef]
67. Syamsudin, M.S.; Riza, L.S.; Rasim, R. Energy Management of a Low-Cost Power Meter using ESP8266 and PZEM-016. *Int. J. Reg. Innov.* **2024**, *4*. [CrossRef]
68. Pawar, J.P.; Amirthaganesh, S.; ArunKumar, S.; Satiesh, K.B. Real-time energy measurement using smart meter. In Proceedings of the 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (ICGET), Coimbatore, India, 19 November 2016; pp. 1–5. [CrossRef]
69. Khattach, O.; Moussaoui, O.; Hassine, M. End-to-End Architecture for Real-Time IoT Analytics and Predictive Maintenance Using Stream Processing and Machine Learning Pipelines. *Sensors* **2025**, *25*, 2945. [CrossRef]
70. Garcia, A.; Oregui, X.; Franco, J.; Arrieta, U.; Ferreres, J.; Valencia, J.A. Time Series Manufacturing Data Edge Monitoring and Visualization to Support Industrial Maintenance Teams. *SN Comput. Sci.* **2023**, *5*, 131. [CrossRef]
71. Grzesik, P.; Mrozek, D. Comparative Analysis of Time Series Databases in the Context of Edge Computing for IoT and Smart Systems. In *Computational Science—ICCS 2020*; Lecture Notes in Computer Science; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020. [CrossRef]
72. Alcaraz, C.; Cumplido, J.; Trivino, A. OCPP in the spotlight: Threats and countermeasures for electric vehicle charging infrastructures 4.0. *Int. J. Inf. Secur.* **2023**, *22*, 1395–1421. [CrossRef]
73. Hsaini, S.; Ghogho, M.; Charaf, M.E.H. An OCPP-Based Approach for Electric Vehicle Charging Management. *Energies* **2022**, *15*, 6735. [CrossRef]
74. Garofalaki, Z.; Kosmanos, D.; Moschoyiannis, S.; Kallergis, D.; Douligeris, C. Electric Vehicle Charging: A Survey on the Security Issues and Challenges of the Open Charge Point Protocol (OCPP). *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2022**, *24*, 1504–1533. [CrossRef]
75. Alcaraz, C.; Lopez, J.; Wolthusen, S. OCPP Protocol: Security Threats and Challenges. *IEEE Trans. Smart Grid* **2017**, *8*, 2452–2459. [CrossRef]
76. Adamska, P.; Juźwin, M.; Wierzbicki, A. Picking Peaches or Squeezing Lemons: Selecting Crowdsourcing Workers for Reducing Cost of Redundancy. In *Computational Science—ICCS 2020*; Krzhizhanovskaya, V., Závodszky, G., Lees, M.H., Dongarra, J.J., Sloot, P.M.A., Brissos, S., Teixeira, J., Eds.; Lecture Notes in Computer Science; Springer: Cham, Switzerland, 2020; p. 12138. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

https://doi.org/10.3390/en19051310

ภาคผนวก ข

ซอร์สโค้ดสำหรับการสื่อสารข้อมูลผ่าน CANopen

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การตั้งค่า Plateform IO ของ Visual Studio Code

```
[env:esp32doit-devkit-v1]          // กำหนด Environment สำหรับบอร์ด ESP32
platform = espressif32             // เลือกแพลตฟอร์ม ESP32 ของ Espressif
board = esp32doit-devkit-v1        // ระบุรุ่นบอร์ดที่ใช้งาน
framework = arduino                // ใช้ Arduino Framework ในการพัฒนาโปรแกรม
monitor_speed = 115200             // กำหนด Baud rate สำหรับ Serial Monitor ใช้ดูค่า Debug
upload_speed = 115200              // กำหนดความเร็วในการอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด
upload_port = COM4                 // ระบุพอร์ตที่เชื่อมต่อกับ ESP32
lib_deps =                         // กำหนด Library ที่ต้องติดตั้งเพิ่มเติม
    adafruit/Adafruit SSD1306      // Library สำหรับควบคุมจอ OLED SSD1306
    adafruit/Adafruit GFX Library  // Library สำหรับแสดงผลกราฟิก
    knolleary/PubSubClient         // Library สำหรับสื่อสาร MQTT
```

```
uint64_t chipID;     // ตัวแปรเก็บหมายเลข Chip ID ของ ESP32
uint32_t can_id;     // ตัวแปรเก็บหมายเลข CAN ID
//---------- ตั้งค่าเริ่มต้น ----------//
void setup() {
// อ่าน Chip ID เพื่อกำหนด CAN ID ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ
  chipID = ESP.getEfuseMac();       Serial.print("Chip ID: ");       Serial.println(chipID, HEX);
// ตรวจสอบ Chip ID เพื่อกำหนดหมายเลข CAN ID เพื่อประจำกล่องโปรไฟล์การชาร์จ
  if (chipID == 0xF4D1B21AD6B8) {
      can_id = 0x500;
  } else if (chipID == 0x1CB2F8BD9E7C) {
      can_id = 0x600;
  } else if (chipID == 0xC0E4B09EFC08) {
      can_id = 0x700;
  } else if (chipID == 0x48BFD1BD9E7C) {
      can_id = 0x800;
  } else {
      can_id = 0x000;   // กรณีไม่พบ Chip ID ที่กำหนด
  }               }
```

```
//---------- อ่านค่าแรงดันจาก Dip Switch ----------//
int readVoltageSetting() {
    int b1 = digitalRead(S1);   // อ่านสถานะสวิตช์ S1
    int b2 = digitalRead(S2);   // อ่านสถานะสวิตช์ S2
    int b3 = digitalRead(S3);   // อ่านสถานะสวิตช์ S3
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
    // รวมค่าบิตจาก Dip Switch
    int val = (b1 << 2) | (b2 << 1) | b3;
// กำหนดค่าแรงดันตามตำแหน่งสวิตช์
    switch (val) {
        case 0b000: return 12;      case 0b001: return 24;
        case 0b010: return 36;      case 0b011: return 48;
        case 0b100: return 60;      case 0b101: return 72;
        case 0b110: return 84;      case 0b111: return 100;
        default: return -1;   // กรณีอ่านค่าไม่ได้
    }
}
```

```
//---------- อ่านค่ากระแสจาก Dip Switch ----------//
int readCurrentSetting() {
    int b4 = digitalRead(S4);   // อ่านสถานะสวิตช์ S4
    int b5 = digitalRead(S5);   // อ่านสถานะสวิตช์ S5
    int b6 = digitalRead(S6);   // อ่านสถานะสวิตช์ S6
    // รวมค่าบิตจาก Dip Switch
    int val = (b4 << 2) | (b5 << 1) | b6;
    // กำหนดค่ากระแสตามตำแหน่งสวิตช์
    switch (val) {
        case 0b000: return 5;       case 0b001: return 10;
        case 0b010: return 15;      case 0b011: return 20;
        case 0b100: return 25;      default: return -1;   // กรณีอ่านค่าไม่ได้
    }
}
```

```
//---------- การส่งค่า CAN ID ด้วยโปรโตคอล CANopen ----------//
float voltage = 0.00;   // ตัวแปรเริ่มต้นเก็บค่าแรงดันไฟฟ้า
float current = 0.00;   // ตัวแปรเริ่มต้นเก็บค่ากระแสไฟฟ้า

void loop() {
//---------- สร้างข้อความ CAN ----------//
    twai_message_t tx_message;
    tx_message.identifier = can_id;        // กำหนด CAN ID
    tx_message.extd = 1;                   // ใช้ Extended ID ขนาด 29-bit CAN ID
    tx_message.rtr = 0;                    // ส่งข้อมูลแบบปกติ (Data Frame)
```

```
    tx_message.data_length_code = 8;  // ส่งข้อมูลจำนวน 8 Byte

//---------------- จัดเก็บข้อมูลลง Data ----------------//
    memcpy(&tx_message.data[0], &voltage, 4);          // เก็บค่าแรงดัน (Voltage) 4 ไบต์
    memcpy(&tx_message.data[4], &current, 4);          // เก็บค่ากระแส (Current) 4 ไบต์

//---------------- ส่งข้อมูลผ่าน CAN ----------------//
    if (twai_transmit(&tx_message, pdMS_TO_TICKS(100)) == ESP_OK) {
        Serial.print("Sent CAN ID: 0x");
        Serial.print(can_id, HEX);
        Serial.print(" V=");
        Serial.print(voltage);
        Serial.print(" A=");
        Serial.println(current);
    } else {
        Serial.println("Failed to transmit");                    // กรณีส่งข้อมูลไม่สำเร็จ
    }
}
```

```
void loop() {
//---------------- การรับค่า CAN ID ด้วยโปรโตคอล CANopen ----------------//
    twai_message_t rx_message;
    float rx_voltage = 0.0;   // ตัวแปรเก็บค่าแรงดันที่รับมา
    float rx_ampere  = 0.0;   // ตัวแปรเก็บค่ากระแสที่รับมา
    uint32_t rx_id = 0;       // ตัวแปรเก็บ CAN ID
//---------------- ตรวจสอบการรับข้อมูล ----------------//
    if (twai_receive(&rx_message, pdMS_TO_TICKS(100)) == ESP_OK) {
        rx_id = rx_message.identifier;      // อ่านค่า CAN ID
        if (rx_message.data_length_code == 8) {
// แปลงข้อมูลจาก Data เป็น float
            memcpy(&rx_voltage, &rx_message.data[0], 4);
            memcpy(&rx_ampere,  &rx_message.data[4], 4);
// ตรวจสอบ CAN ID ของแต่ละกล่อง
            if (rx_id == 0x500 || rx_id == 0x600 || rx_id == 0x700 || rx_id == 0x800) {
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
            Serial.print("Received from CAN ID: 0x");
            Serial.print(rx_id, HEX);
            Serial.print(" V=");
            Serial.print(rx_voltage);
            Serial.print(" A=");
            Serial.println(rx_ampere);
        } else {
            Serial.print("Unknown CAN ID: 0x");
            Serial.println(rx_id, HEX);
        }
    } else {
        Serial.println("Invalid data length");      // ข้อมูลไม่ครบ 8 Byte
    }
} else {
    Serial.println("No data received");            // ไม่พบข้อมูลที่รับเข้ามา
}  delay(2000);                                     // หน่วงเวลาก่อนวนลูปรอบถัดไป
}
```

```
//---------- ตั้งค่าการเชื่อมต่อ WiFi และ MQTT ----------//
void setup() {
    setupWiFi(); // เชื่อมต่อเครือข่าย WiFi
    // กำหนด MQTT Server และ Port
    client.setServer(mqtt_server, 1883);
}
void loop() {
//---------- ตรวจสอบการเชื่อมต่อ MQTT ----------//
    if (!client.connected()) {
        reconnectMQTT(); // เชื่อมต่อ MQTT ใหม่กรณีหลุด
    }
    client.loop(); // รักษาสถานะการเชื่อมต่อ MQTT

//---------- ตรวจสอบข้อมูล CAN ----------//
    if (dataReceived) {
        // สร้างข้อความ JSON สำหรับส่ง MQTT
        String payload = "{";
        payload += "\"can_id\":\"" + String(rx_id, HEX) + "\",";
        payload += "\"voltage\":" + String(rx_voltage) + ",";
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        payload += "\"current\":" + String(rx_ampere);
        payload += "}";

//---------------- ส่งข้อมูลไปยัง MQTT Broker ----------------//
        if (client.publish(mqtt_topic, payload.c_str())) {
            Serial.println("MQTT message sent");                    // ส่งข้อมูลสำเร็จ
        } else {
            Serial.println("Failed to send MQTT message");    // ส่งข้อมูลไม่สำเร็จ
        }
    }
    delay(5000); // หน่วงเวลา 5 วินาทีก่อนวนลูปรอบถัดไป
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

ข้าพเจ้า นายณัฐพล ดลเจริญนนท์ ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีความสนใจด้านระบบไฟฟ้า ระบบควบคุม และเทคโนโลยีการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า อาศัยอยู่ที่บ้านเลขที่ 57 หมู่ 13 ตำบลเมืองปัก อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา สามารถติดต่อได้ที่หมายเลขโทรศัพท์ 081-593-4343

ข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในระหว่างการศึกษาได้พัฒนาทักษะด้านการวิเคราะห์ระบบ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การควบคุมระบบ และการใช้ซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม เช่น MATLAB/Simulink ควบคู่กับประสบการณ์ฝึกงานในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบเครื่องจักรและระบบควบคุม นอกจากนี้ ข้าพเจ้ายังมีประสบการณ์ทำงานในตำแหน่งลูกจ้างโครงการวิจัย ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ซึ่งช่วยเสริมสร้างความเข้าใจในการทำงานวิจัย การวิเคราะห์ข้อมูล และการทำงานร่วมกับทีมวิจัยอย่างเป็นระบบ

ในระหว่างการศึกษา ข้าพเจ้าได้ทำหน้าที่เป็นอาจารย์สอนพิเศษในรายวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งช่วยพัฒนาทักษะด้านการถ่ายทอดองค์ความรู้ การสื่อสาร และการทำงานร่วมกับผู้อื่น อีกทั้งยังเป็นผู้มีความรับผิดชอบสูง มีมนุษยสัมพันธ์ที่ดี และสามารถทำงานภายใต้แรงกดดันได้เป็นอย่างดี โดยข้าพเจ้ามุ่งมั่นที่จะพัฒนาศักยภาพของตนเองอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำองค์ความรู้และประสบการณ์ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสรรค์เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมและประเทศชาติในอนาคต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี