

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

4.2 การตั้งค่าการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ

การตั้งค่าการทดลองถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับทดสอบการทำงานของระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำภายใต้สภาวะการทำงานจริง โดยระบบประกอบด้วยตัวควบคุมหลัก 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



รูปที่ 4.1 การตั้งค่าการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ

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

4.3 การตรวจสอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่าน CANopen

การทดลองในส่วนนี้ถูกดำเนินการเพื่อประเมินความถูกต้องของกระบวนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จผ่านระบบสื่อสาร CANopen โดยแบตเตอรี่แต่ละชุดจะทำการส่ง CAN ID เพื่อใช้ระบุโปรไฟล์การชาร์จเข้าสู่ตัวชาร์จผ่าน 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

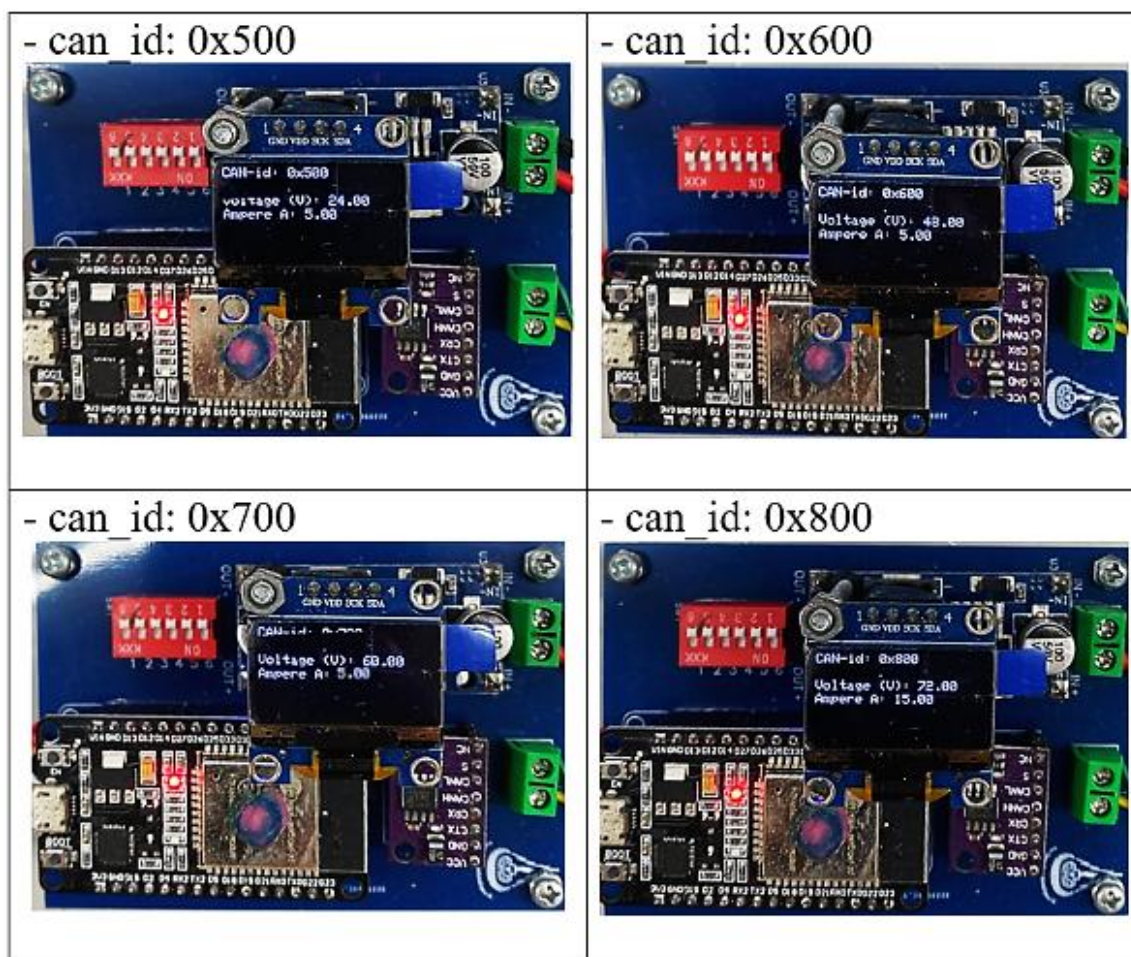
ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการเลือกโปรไฟล์การชาร์จจากค่า CAN ID แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้ตรงกับค่าที่กำหนดไว้ในทุกกรณี โดยไม่พบความผิดพลาดในการแมปค่า CAN ID กับโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่ ทั้งนี้ผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรของ Communication layer และความสามารถของ 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 สามารถกำหนดค่าการชาร์จของเครื่องชาร์จเตลต้าได้อย่างถูกต้องตามเงื่อนไขที่กำหนด ทั้งนี้ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสื่อสาร CANopen และกระบวนการเลือกโปรไฟล์การชาร์จสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างต่อเนื่องและมีความน่าเชื่อถือสำหรับการใช้งานในระบบชาร์จแบตเตอรี่หลายโปรไฟล์ภายในตู้ชาร์จเดียวกัน

นอกจากนี้ ยังทำการตรวจสอบข้อมูลโปรไฟล์การชาร์จผ่านจอ OLED ของ ESP32 เพื่อื่อยืนยันความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ก่อนเข้าสู่ 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

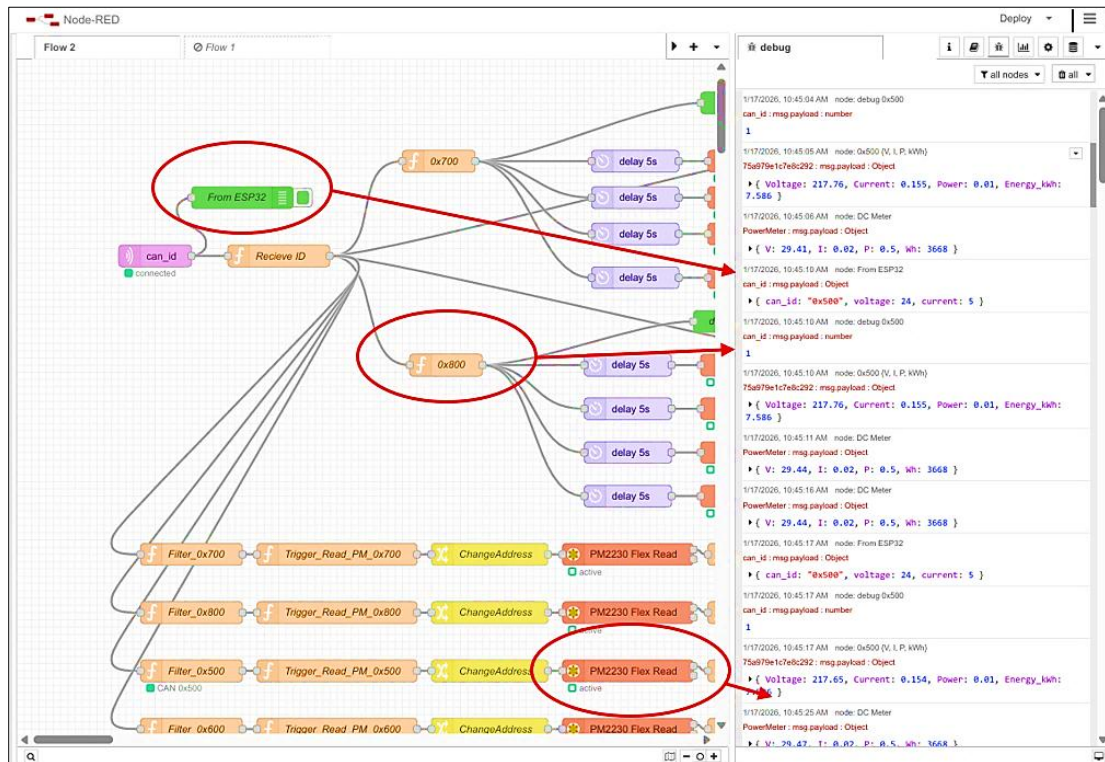
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าแต่ละ CAN ID สามารถระบุโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่ได้อย่างชัดเจน โดย CAN ID 0x500 ถูกกำหนดให้ใช้โปรไฟล์ 24V 5A ขณะที่ CAN ID 0x600, 0x700 และ 0x800 ถูกใช้สำหรับโปรไฟล์ 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวถูกแสดงผ่านจอ OLED ของ ESP32 เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนเข้าสู่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

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 ของเครื่องชาร์จเตลต้าให้สอดคล้องกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน 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



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 ของเครื่องชาร์จเซลล์ให้ตรงกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน 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 จะทำการเลือกเส้นทางในการอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าตาม CAN ID ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่กระบวนการ Monitoring และ Data logging ของระบบชาร์จต่อไป ผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบ Supervisory layer สามารถทำงานร่วมกับ Communication layer และ Execution layer ได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ระบบสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ควบคุมเครื่องชาร์จ และติดตามข้อมูลของระบบได้ภายใต้โครงสร้างการสื่อสารเดียวกันอย่างมีประสิทธิภาพ

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

การทดลองในส่วนนี้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าฝั่งขาเข้าของเครื่องชาร์จเซลล์ในระหว่างกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ 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 โดยข้อมูลที่ถูกรับที่ประกอบด้วยเวลา ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสะสม ประเภทช่วงเวลา TOU (Time of Use) อัตราค่าไฟฟ้า และค่าคำนวณต้นทุนด้านพลังงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทั้งนี้การจัดเก็บข้อมูลในลักษณะดังกล่าวช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มของการใช้พลังงาน ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าฝั่งขาเข้า และใช้สำหรับประเมินต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องชาร์จในแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่อง

	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



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

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าฝั่ง AC มีลักษณะค่อนข้างคงที่ในช่วงประมาณ 220 V ตลอดการทดลอง ขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะของกระบวนการชาร์จ นอกจากนี้ค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาของการทำงาน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการติดตามและจัดเก็บข้อมูลพลังงานแบบ Real-time ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบชาร์จ ประเมินเสถียรภาพของ Execution layer และตรวจสอบความต่อเนื่องของกระบวนการชาร์จในแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในช่วงเวลา On-Peak แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟฟ้าสูงตามโครงสร้าง TOU ของการไฟฟ้า ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ต้นทุนการใช้พลังงานของระบบชาร์จภายใต้ช่วงเวลาที่มีการไหลสูงของระบบไฟฟ้า 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 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟฟ้าต่ำกว่า 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

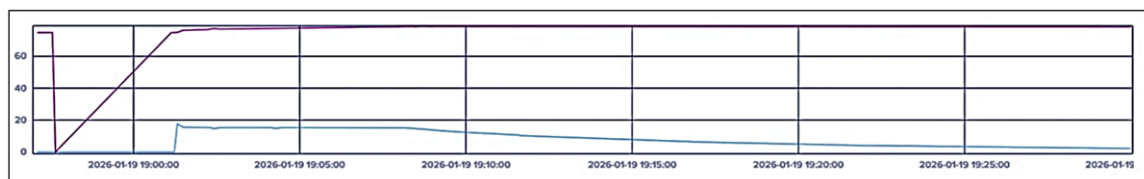
จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของระบบชาร์จในช่วง Off-Peak มีค่าต่ำกว่าช่วง On-Peak ในทุกโปรไฟล์การชาร์จ เนื่องจากอัตราค่าไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ส่งผลให้การชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงเวลาดังกล่าวมีความเหมาะสมในด้านต้นทุนพลังงานมากกว่า ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็น

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

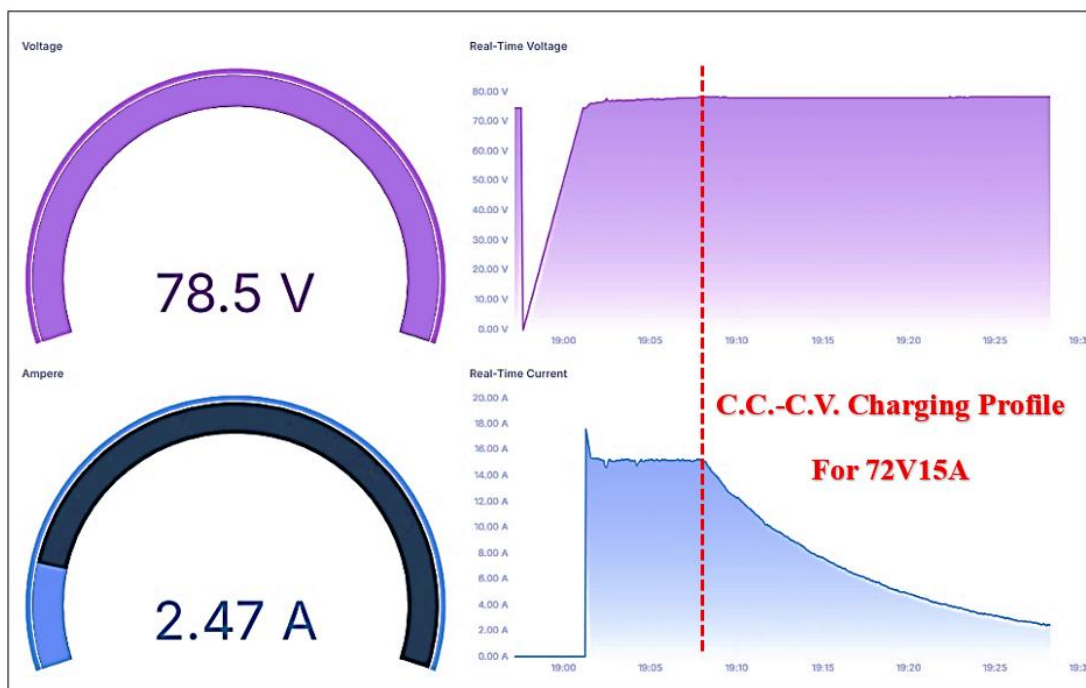


รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลแรงดันและกระแสในฐานข้อมูล InfluxDB จากมิเตอร์ฝั่ง DC

*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 หรือความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จ 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



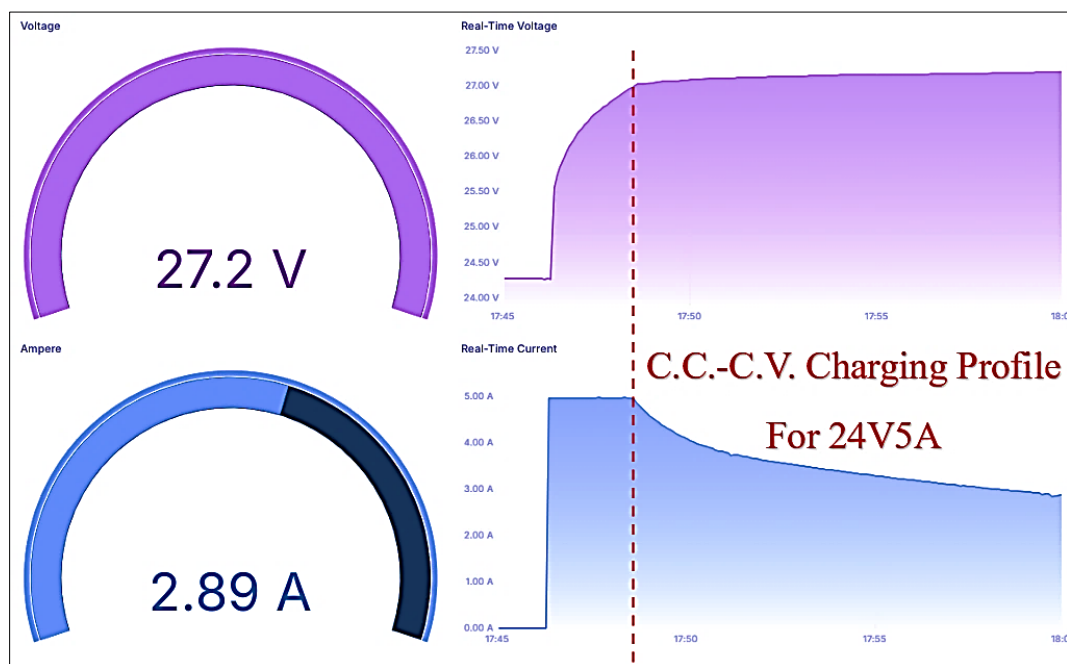
รูปที่ 4.8 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 72V 15A แสดงผ่าน Grafana

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าลักษณะของกราฟกำลังไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV โดยในช่วง CC ระบบมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูงเพื่อรองรับกระแสชาร์จที่ ก่อนที่กำลังไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงในช่วง CV ตามการลดลงของกระแสไฟฟ้า ขณะที่กราฟพลังงานไฟฟ้าสะสมมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการจ่ายพลังงานให้กับแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดกระบวนการชาร์จ

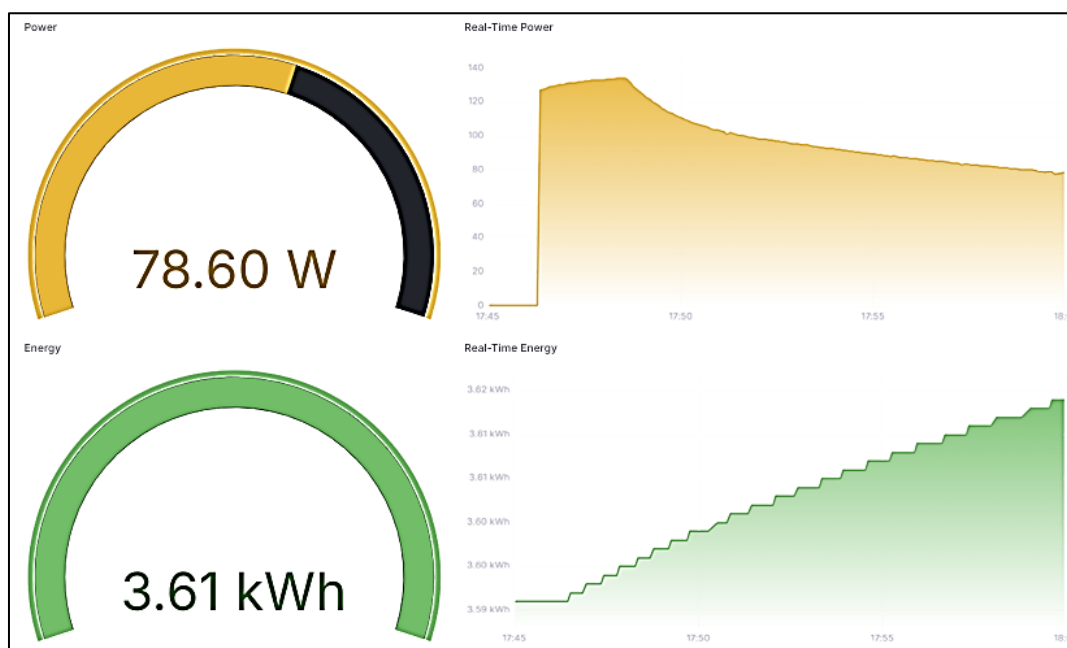
ผลการทดลองของโปรไฟล์ 24V 5A แสดงดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ขณะที่ผลการทดลองของโปรไฟล์ 48V 5A และ 60V 5A แสดงดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.14 ตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องในทุกโปรไฟล์การชาร์จ ทั้งนี้พฤติกรรมของกราฟแรงดันและกระแสยังคงมีลักษณะสอดคล้องกับการชาร์จแบบ 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

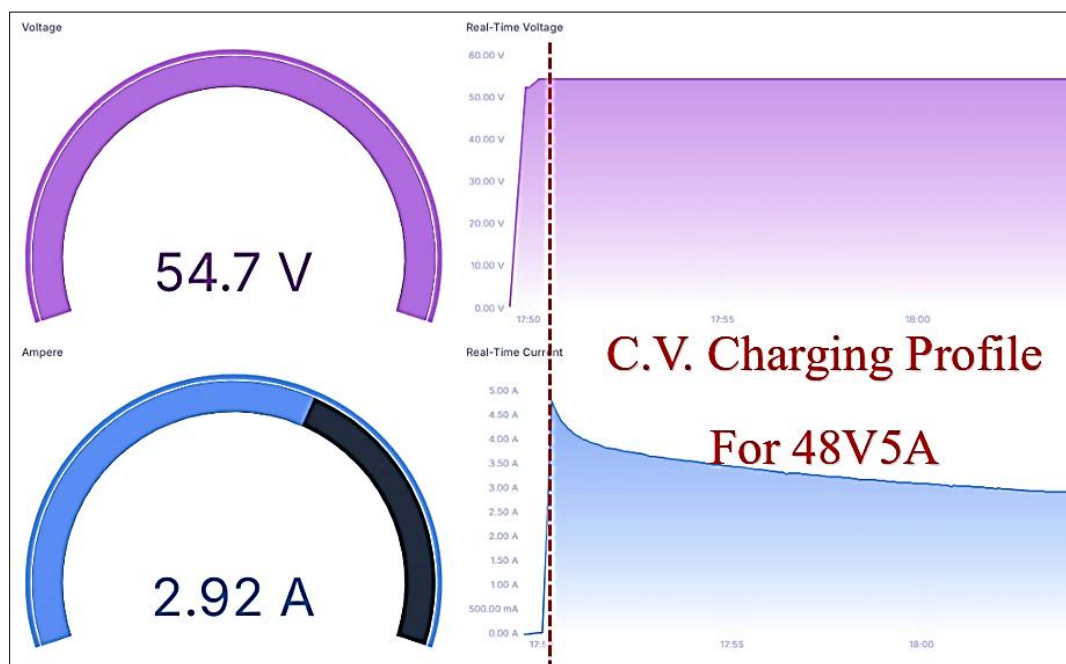


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 24V5A แสดงพฤติกรรม CC-CV ผ่าน Grafana

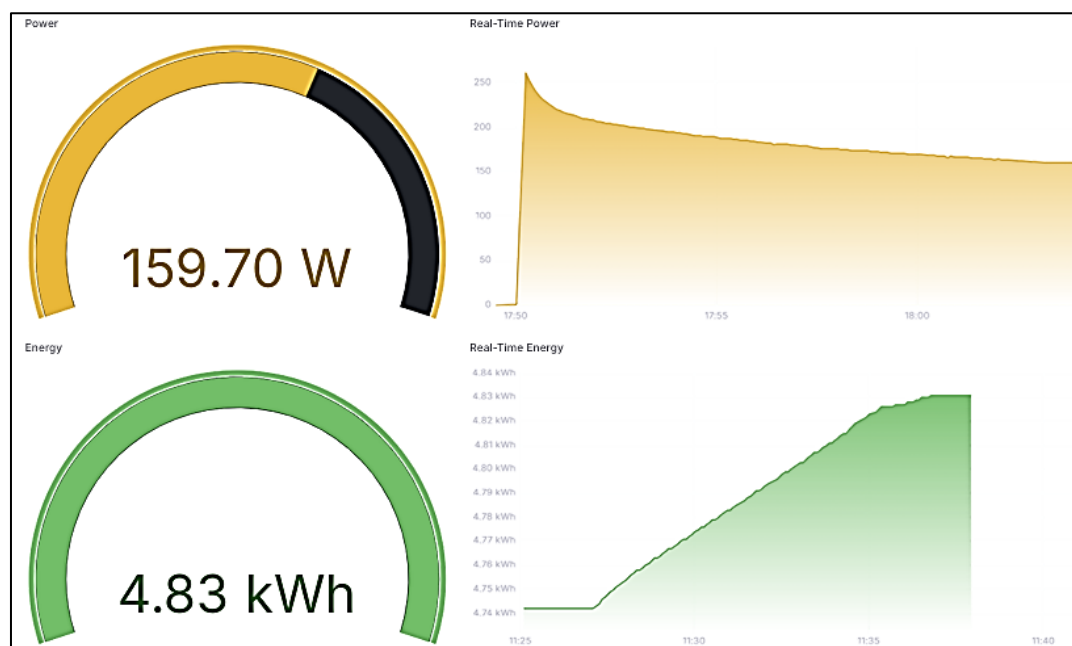


รูปที่ 4.10 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 24V5A แสดงผ่าน Grafana

- กรณีศึกษา 48V 5A พฤติกรรมการชาร์จ CC-CV

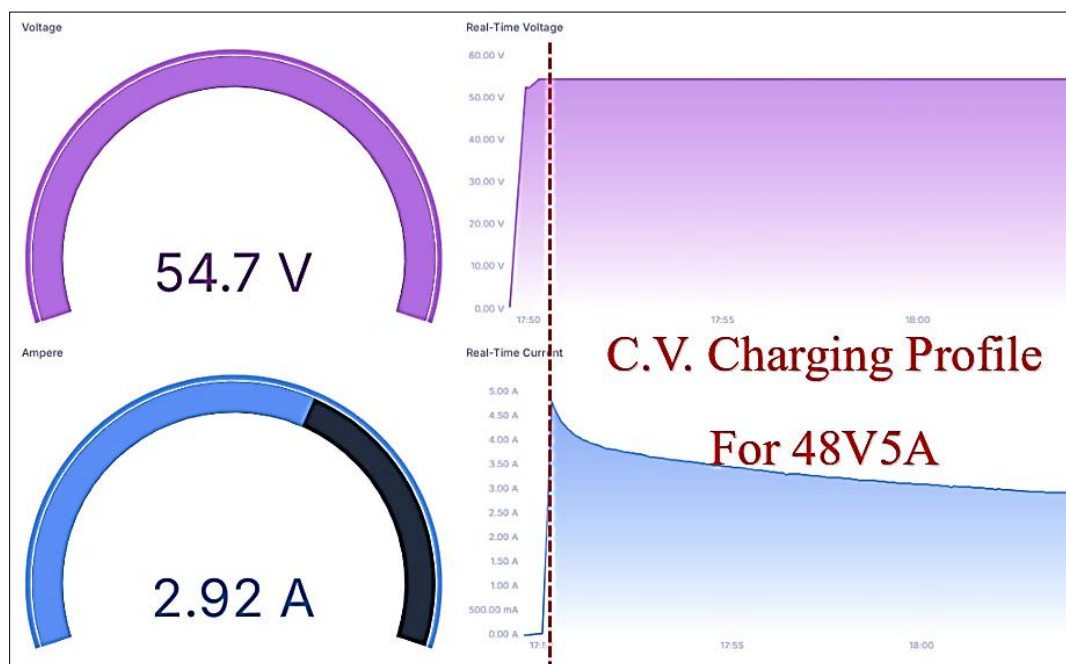


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ในโปรไฟล์ 48V5A แสดงพฤติกรรม CC-CV ผ่าน Grafana

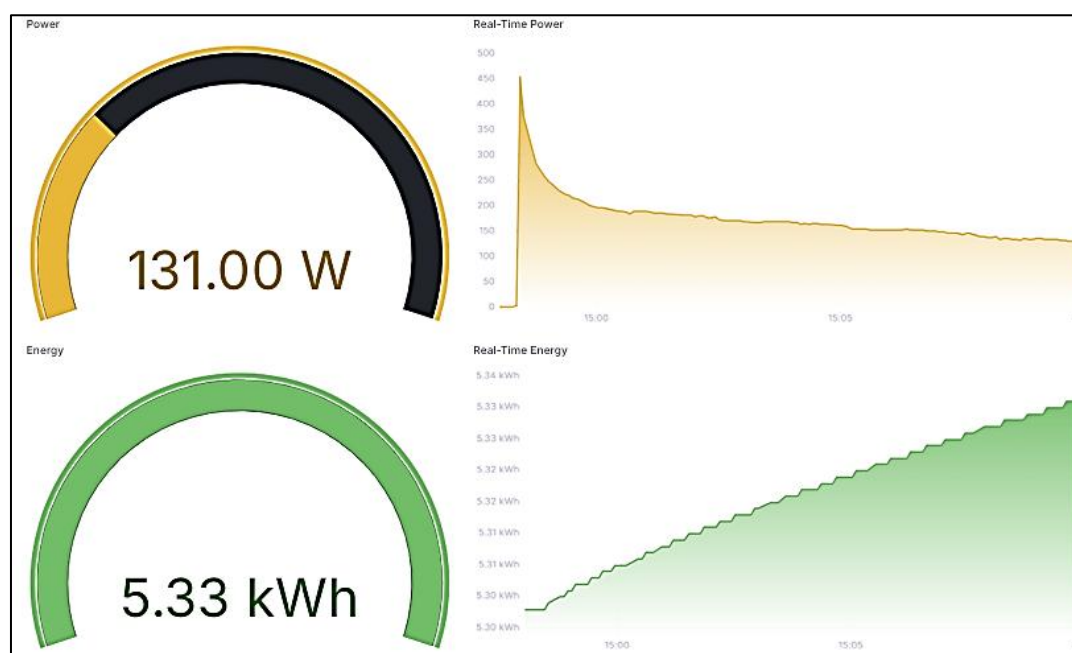


รูปที่ 4.12 กราฟกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ 48V5A แสดงผ่าน Grafana

- 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 ผลกระทบของความไม่สมดุลของเซลล์แบตเตอรี่ต่อพฤติกรรมการณ์การชาร์จ

จากผลการทดลองของระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ พบว่าในบางกรณี กระบวนการชาร์จไม่สามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่องตามลักษณะของการชาร์จแบบ CC-CV เนื่องจากเกิดความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ภายในแพ็ค 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 ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันภายในแพ็คแบตเตอรี่ 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 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องชาร์จเซลล์ต่ำชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละโปรไฟล์

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 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้เงื่อนไขการชาร์จแบบ CC-CV ของแต่ละโปรไฟล์แบตเตอรี่