

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไฟฟ้าได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบพลังงานสมัยใหม่ ทั้งในภาคยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานแบบกระจายตัว ระบบพลังงานหมุนเวียน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการพลังงาน ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานคาร์บอนต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Tarascon, 2001 ได้รายงานว่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความได้เปรียบทั้งด้านความหนาแน่นพลังงาน ประสิทธิภาพการชาร์จ-คายประจุ อัตราการคายประจุเองต่ำ และอายุการใช้งานที่ยาวนาน เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดอื่น ส่งผลให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนกลายเป็นเทคโนโลยีหลักของระบบกักเก็บพลังงานในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เมื่อรูปแบบการประยุกต์ใช้งานมีความหลากหลายมากขึ้น การกำหนดพารามิเตอร์การทำงานให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญ โดยเฉพาะในกระบวนการเลือกโพรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบพลังงาน

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

แม้ว่า CC-CV จะยังคงเป็นแนวทางมาตรฐานสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากสามารถควบคุมสมดุลระหว่างอัตราการชาร์จ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน และความปลอดภัยของเซลล์ได้อย่างเหมาะสม แต่ Notten, 2007 ได้รายงานว่าคุณสมบัติของกระบวนการชาร์จไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการชาร์จเพียงอย่างเดียว 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 แนวทางดังกล่าวจึงมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่หลายฟิสิกส์ภายใต้แพลตฟอร์มเดียว โดยเฉพาะระบบที่ต้องอาศัยข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการเลือกโปรไฟล์การชาร์จอย่างถูกต้องและลดความผิดพลาดจากการตั้งค่าด้วยมนุษย์

ดังนั้น บทนี้จึงนำเสนอทฤษฎีพื้นฐาน เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่ผ่านมาในด้านแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำ การชาร์จแบบฟูลล์ 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 ในระบบแบตเตอรี่แรงดันต่ำที่มีความแตกต่างของค่าพิกัดแรงดัน กระแส และความจุของแบตเตอรี่ การทำความเข้าใจพฤติกรรมทางไฟฟ้า โครงสร้างภายใน และคุณลักษณะทางพลวัตของแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์สมรรถนะและการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระบบ

2.2.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

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

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

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

สมการดังกล่าวถูกใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์พฤติกรรมการชาร์จและใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดช่วงการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับสถานะของแบตเตอรี่

2.2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของ NMC

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

$$E = V \times Q \quad (2.2)$$

2.2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ NMC แรงดันต่ำ

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ NMC แรงดันต่ำขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนาน รวมถึงค่าพิกัดแรงดันและกระแสที่ออกแบบสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน โดย Lu, 2013 ได้รายงานว่าการเชื่อมต่อเซลล์แบบอนุกรมจะส่งผลต่อระดับแรงดันของแบตเตอรี่แพ็คเกจ ขณะที่การเชื่อมต่อแบบขนานจะส่งผลต่อความสามารถในการจ่ายกระแสและความจุรวมของระบบ ดังนั้น การออกแบบแบตเตอรี่แพ็คเกจในช่วงแรงดันต่ำ เช่น 24V, 48V, 60V และ 72V จึงจำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ ค่าพิกัดทางไฟฟ้า และข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญต่อการกำหนดพารามิเตอร์และการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละระดับแรงดัน

สมการแรงดันรวมของแบตเตอรี่แพ็คเกจได้จากสมการที่ (2.3)

$$V_{\text{pack}} = N_s \times V_{\text{cell}} \quad (2.3)$$

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ

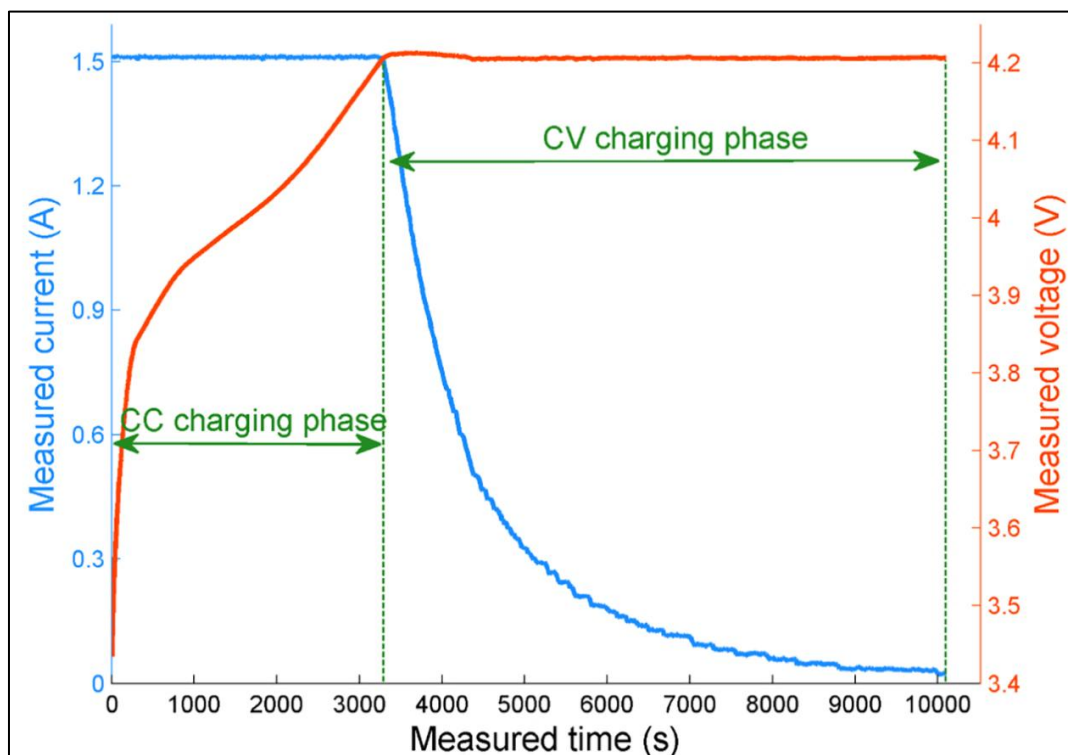
การเลือกโปรไฟล์การชาร์จของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าพิกัดแรงดันหรือกระแสเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสถานะประจุ ความต้านทานภายใน อุณหภูมิ อัตราการชาร์จ และอายุการใช้งานของเซลล์ โดย Balasingam, 2020 ได้รายงานว่าการกำหนดพารามิเตอร์การชาร์จที่ไม่สอดคล้องกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ความไม่สมดุลของเซลล์ และการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร ดังนั้น การวิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าและคุณสมบัติเฉพาะของแบตเตอรี่จึงเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนการกำหนดเงื่อนไขและการเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้มีความถูกต้อง แม่นยำ และสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานจริง

2.3 หลักการชาร์จแบตเตอรี่แบบฟูลล์ 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

สมการช่วงกระแสคงที่ทำได้จากสมการที่ (2.4)

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

โดยที่ ค่า polarization voltage สามารถอธิบายเชิงพลวัตได้จากสมการที่ (2.5)

$$\frac{dV_p(t)}{dt} = -\frac{1}{R_p C_p} V_p(t) + \frac{I_{cc}}{C_p} \quad (2.5)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า เมื่อค่ากระแสชาร์จถูกกำหนดคงที่ อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาที่ระบบจะเข้าสู่ช่วงแรงดันคงที่ และเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดโปรไฟล์การชาร์จในแต่ละระดับแรงดัน

2.3.2 ช่วงแรงดันคงที่ (Constant Voltage Region)

เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นถึงค่าแรงดันเป้าหมาย ระบบจะเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงแรงดันคงที่ โดยรักษาค่าแรงดันไว้ที่ระดับคงที่ ขณะที่ค่ากระแสจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามความสามารถในการรับประจุของเซลล์ โดย Bercebar, 2016 ได้รายงานว่าการลดลงของกระแสในช่วง CV มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความต้านทานภายใน สุขภาพของแบตเตอรี่ และประสิทธิภาพในการรับประจุของเซลล์ ดังนั้น ข้อมูลในช่วงนี้จึงสามารถใช้ประเมินสมรรถนะของแบตเตอรี่และใช้ประกอบการเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความสัมพันธ์ของแรงดันปลายทางในช่วง CV สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.6)

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.6)$$

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 การกำหนดค่ากระแสที่ 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 ได้รายงานไว้ว่า 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)

$$\text{CAN}_{\text{message}} = \{\text{ID}, \text{DLC}, \text{DATA}, \text{CRC}\} \quad (2.7)$$

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 ได้รายงานไว้ว่า 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 ซึ่งเหมาะสมต่อระบบแบตเตอรี่ที่ต้องมีการติดตามสถานะและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทำงาน

2.4.3 CAN Identifier สำหรับการระบุพารามิเตอร์แบตเตอรี่

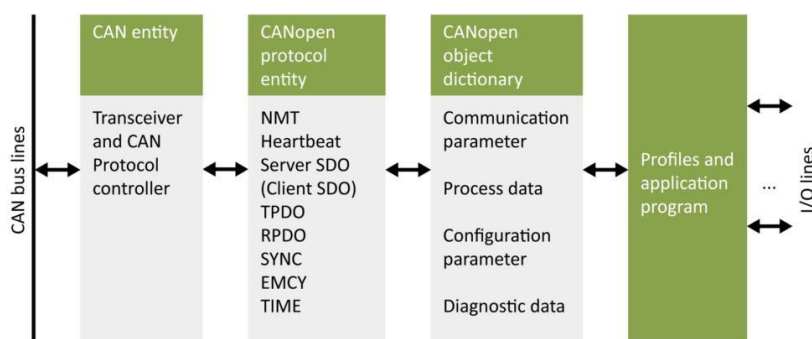
ในระบบ CANopen ค่า CAN Identifier ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงระบุประเภทของข้อความเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้กำหนดตัวตนของอุปกรณ์และลำดับความสำคัญของข้อมูลภายในเครือข่ายได้อีกด้วย โดยการกำหนด Identifier ให้สอดคล้องกับชนิดของแบตเตอรี่หรือระดับแรงดันของระบบ จะช่วยให้หน่วยควบคุมสามารถระบุคุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ 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 ได้รายงานไว้ว่า 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)

$$\text{Publisher} \rightarrow \text{Broker} \rightarrow \text{Subscriber} \quad (2.8)$$

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 ได้รายงานไว้ว่า Modbus RTU ใช้ Master-slave communication architecture ซึ่ง Master จะทำหน้าที่ร้องขอข้อมูลหรือส่งคำสั่งควบคุมไปยัง Slave device ผ่าน Register-based communication ทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภาคสนามได้อย่างแม่นยำและมีความต่อเนื่องเชิงกำหนด

โครงสร้างข้อมูลของ Modbus RTU สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\text{Frame} = \{\text{Address}, \text{Function}, \text{Data}, \text{CRC}\} \quad (2.9)$$

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 ได้รายงานว่ 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 ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเชื่อมโยงข้อมูลจากแบตเตอรี่ไปสู่การกำหนดเงื่อนไขและการเลือกโปรไฟล์การชาร์จในระบบหลายฟิวกัด

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 ได้รายงานว่ฐานข้อมูลแบบ 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 โดยข้อมูลแต่ละชุดจะถูกจัดเก็บพร้อมกับ 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)

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

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 ค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า พลังงานสะสม อุณหภูมิ และสถานะของกระบวนการชาร์จ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงของการชาร์จแบบ CC-CV ดังนั้น Dashboard visualization จึงไม่เพียงทำหน้าที่แสดงข้อมูลเท่านั้น แต่ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มของพฤติกรรมแบตเตอรี่และประเมินสมรรถนะของระบบได้แบบเวลาจริง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลแบบเวลาจริงสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.11)

$$x(t) = x_0 + \Delta x(t) \quad (2.11)$$

สมการดังกล่าวใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่องในระบบ Monitoring และ Supervisory control

2.6.3 การติดตามข้อมูลด้านอินพุตของระบบชาร์จ

ข้อมูลด้านอินพุตของระบบชาร์จประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานสะสม และตัวประกอบกำลัง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบและการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในกระบวนการชาร์จ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.12)

$$P_{AC} = V_{AC} I_{AC} PF \quad (2.12)$$

ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบชาร์จ รวมถึงประเมินต้นทุนด้านพลังงานในแต่ละช่วงเวลาการทำงาน

2.6.4 การติดตามข้อมูลด้านเอาต์พุตของระบบชาร์จ

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

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} \quad (2.13)$$

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) ซึ่งกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับผู้บริโภคไฟฟ้าแรงดันต่ำ 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)

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

ในระบบดิจิทัลที่มีการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง พลังงานไฟฟ้าสามารถคำนวณในรูปแบบ Discrete และการคำนวณประสิทธิภาพได้ดังสมการที่ (2.15)

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

สมการดังกล่าวถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบ Energy monitoring และระบบวิเคราะห์พลังงานแบบเวลาจริง เนื่องจากสามารถคำนวณพลังงานจากข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่อง

2.7.4 การคำนวณต้นทุนพลังงานแบบ TOU

ต้นทุนพลังงานของระบบชาร์จแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับทั้งปริมาณพลังงานที่ใช้และช่วงเวลาทำการชาร์จ เนื่องจากอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU กำหนดอัตราค่าไฟฟ้าแตกต่างกันระหว่างช่วง On-Peak และ Off-Peak ดังนั้น การคำนวณต้นทุนพลังงานจำเป็นต้องพิจารณาพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาแยกจากกัน ต้นทุนพลังงานสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.16)

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

สมการดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินต้นทุนของกระบวนการชาร์จในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างชัดเจน และสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของช่วงเวลาการชาร์จที่มีต่อต้นทุนพลังงานของระบบได้

2.7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโปรไฟล์การชาร์จกับต้นทุนพลังงาน

แม้ว่ากระบวนการชาร์จแบบฟิกส์ CC-CV จะถูกออกแบบเพื่อรักษาสมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความปลอดภัยของแบตเตอรี่ แต่พฤติกรรมของโปรไฟล์การชาร์จยังส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการใช้พลังงานและต้นทุนด้านพลังงานของระบบอีกด้วย โดยเฉพาะระยะเวลาของช่วง CC และ CV ซึ่งมีผลต่อปริมาณพลังงานที่ใช้และช่วงเวลาที่เกิดการใช้พลังงานสูงสุด

ในระบบแบตเตอรี่หลายระดับแรงดัน ความแตกต่างของค่ากระแสชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ และระยะเวลาการชาร์จ ส่งผลให้ลักษณะการใช้พลังงานแตกต่างกันในแต่ละระบบ ดังนั้น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโปรไฟล์การชาร์จและต้นทุนพลังงานจึงมีความสำคัญต่อการประเมินสมรรถนะของระบบ และสามารถประกอบการศึกษาเลือกเงื่อนไขการชาร์จที่เหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพพลังงานและต้นทุนการใช้งาน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลุ่มเทคนิคการชาร์จแบตเตอรี่ (Charging Methods)

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

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>

เนื้อหาบทความ:

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

ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลกระทบของการชาร์จที่อัตรากระแสสูง (High C-rate) ต่อพฤติกรรมของแบตเตอรี่ โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญ เช่น การสะสมของลิเทียมบนขั้วไฟฟ้า (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 จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบควบคุมที่สามารถปรับพารามิเตอร์ได้ตามสถานะจริงของแบตเตอรี่

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้สนับสนุนแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับข้อจำกัดของการชาร์จแบบ CC-CV ซึ่งถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะในประเด็นความไม่ยืดหยุ่นต่อสถานะการใช้งานจริง 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 ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมและวิเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลวิชาการเพื่อนำมาเปรียบเทียบเทคนิคการชาร์จหลัก 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 ดังนั้นการเลือกวิธีการชาร์จที่เหมาะสมจำเป็นต้องพิจารณาพร้อมกับสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

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

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

การประยุกต์ใช้ CANopen ในระบบ Battery Management System (BMS)

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 และความสามารถในการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถนำไปใช้งานร่วมกับยานยนต์ไฟฟ้าได้จริง

ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรับและแสดงผลข้อมูลจาก BMS ผ่าน CANopen ได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง โดยมีความหน่วงต่ำและสามารถแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสะดวกในการติดตามสถานะแบตเตอรี่และปรับปรุงประสบการณ์การใช้งานของระบบยานยนต์ไฟฟ้า

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

บทความนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยของผู้วิจัยในด้านการใช้โปรโตคอล CANopen ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะการรับ-ส่งข้อมูลจากแบตเตอรี่และระบบ BMS อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้พัฒนาต่อยอดจากแนวคิดดังกล่าว โดยไม่ได้ใช้ CANopen เพียงเพื่อการแสดงผลข้อมูลแต่ใช้เป็นกลไกหลักในการ “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 ในเชิงวิธีการ ผู้วิจัยได้ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบที่สามารถรับข้อมูลจากแบตเตอรี่ 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 ได้อย่างถูกต้อง และมีความเสถียร โดยข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดจริง และสามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังพบว่าระบบมีความหน่วงต่ำเพียงพอสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงทำหน้าที่ในลักษณะของ “การสื่อสารและแสดงผลข้อมูล” เป็นหลัก และยังไม่ได้มีการนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบในระดับปฏิบัติการ (execution layer)

ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้:

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

กลุ่มที่ 3: การสื่อสาร Modbus RTU สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ระดับฟิวด์

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) การกำหนดช่วงเวลาระหว่างเฟรม (เช่น $t_{3.5}$)
- 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 บทความนี้จะสนับสนุนแนวคิดว่าการพัฒนาโครงสร้างการสื่อสารให้มีลักษณะ Deterministic จะช่วยเพิ่มความแม่นยำ ความเสถียร และความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการควบคุมในระดับ Execution layer

กลุ่มที่ 4: การประมวลผลและแสดงผลข้อมูลด้วย Node-RED และ Grafana

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 ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการ 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 โดยมีความแม่นยำของการนำไฟฟ้ามากกว่า 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 และพฤติกรรมของการชาร์จแบบเรียลไทม์ 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 และพฤติกรรมชาร์จแบบเรียลไทม์ 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 ในเชิงปัญหา ผู้วิจัยระบุว่า 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 โดยสามารถช่วยลดความเสี่ยงจากช่องโหว่และเพิ่มความปลอดภัยของระบบได้อย่างไรก็ตาม 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 ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระบบสื่อสารไร้สายความถี่สูงและระบบเรดาร์

ผลการวิจัยพบว่า เทคโนโลยี Transmitarray antenna แบบปรับเปลี่ยนได้มีศักยภาพสูงในการควบคุมทิศทางของสัญญาณอย่างยืดหยุ่น และสามารถนำไปใช้ในระบบสื่อสารสมัยใหม่ได้อย่างไรก็ตาม 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 และอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะหรืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในระยะยาว

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 โดยยังขาดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมกรรมการชาร์จ พลังงานไฟฟ้าด้านอินพุต และต้นทุนด้านพลังงานภายใต้โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบชาร์จในสถานะการใช้งานจริง

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

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