

การพัฒนาและการตรวจสอบแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยการทดสอบฮาร์ดแวร์

Development and Hardware Validation of a First-Order Equivalent Circuit Model for Lithium-ion Batteries

ทัต ธานีจ¹ ณัฐพนธ์ หาดอ้าน¹ อมรเทพ แมนสุข¹ กมลภัตสร มั่นศิลป์² วัชรกร ปิ่นธุรรัตน์^{1*} และ บุญเรือง มะรังศรี³
That Thannakit¹ Nattapon Hadarn¹ Amonthep mansuk¹ Kamonpad Mansilp² Watcharakorn Pinthurat^{1*}
and Boonruang Marungsri³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี 22210

²สาขาวิศวกรรมยานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี 22210

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi 22010

²Department of Modern Automotive Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi 22010

³School o School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

Corresponding author: watcharakorn_pi@mutto.ac.th

Abstract

This study presents the development and hardware validation of a first-order equivalent circuit model (ECM) for a lithium-ion battery using MATLAB/Simulink (License No. 41282542). The model consists of the open-circuit voltage (OCV), internal resistance, and a resistance-capacitance network to represent the steady-state and transient behaviors of the battery. The model parameters were determined from the relationships between the state of charge (SoC) and the electrical parameters of the battery. A hardware testing setup was then developed to measure the battery voltage, load current, and SoC of a 3.7-V, 12-Ah lithium-ion battery under a discharge condition for model validation. The comparison results showed that the simulated voltage, load current, and SoC followed the overall trends of the experimental measurements. The simulated voltage decreased from approximately 3.68 V to 3.64 V, while the experimental voltage ranged from approximately 3.67 to 3.65 V. The simulated load current was approximately 1.70 A, whereas the experimental current ranged from approximately 1.60 to 1.65 A. At approximately 1,200 s, the experimental SoC was 29.8%, compared with 28.0% obtained from the simulation. The differences between the simulation and experimental results can be

attributed to physical factors that were not included in the model, such as temperature effects, variations in internal resistance, and losses in the practical system.

Keywords: Lithium-ion battery, mathematical modeling, equivalent circuit model, first-order circuit

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยมุ่งเน้นการประเมินความสามารถของแบบจำลองในการแทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการคายประจุจริง แบบจำลองได้รับการพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (License No. 41282542) โดยประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และวงจรความต้านทาน-ตัวเก็บประจุสำหรับแทนพฤติกรรมทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะชั่วคราว ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของสถานะประจุของแบตเตอรี่ จากนั้นผู้วิจัยได้พัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไหล และสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาด 3.7 V ความจุ 12 Ah เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองภายใต้สภาวะการคายประจุ ผลการตรวจสอบพบว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลักได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแรงดันจากแบบจำลองลดลงจากประมาณ 3.68 V เป็น 3.64 V ขณะที่ผลการทดลองกับแบตเตอรี่จริงอยู่ในช่วงประมาณ 3.67–3.65 V กระแสไหลจากแบบจำลองมีค่าประมาณ 1.70 A ขณะที่ผลการทดลองกับแบตเตอรี่จริงอยู่ในช่วงประมาณ 1.60–1.65 A และที่เวลาประมาณ 1,200 s ค่าสถานะประจุจากการทดลองกับแบตเตอรี่จริงและการจำลองมีค่าเท่ากับ 29.8% และ 28.0% ตามลำดับ หรือมีความแตกต่างประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสามารถใช้แทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองที่ยังไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามสภาวะการทำงาน และความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจริง

คำสำคัญ : แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, แบบจำลองสมมูลวงจร, วงจรอันดับหนึ่ง

1. บทนำ

ในปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีบทบาทสำคัญในระบบพลังงานสมัยใหม่ [1] เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้ และมีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงาน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบจัดการแบตเตอรี่และระบบจัดการพลังงาน โดยเฉพาะการทำนายแรงดัน กระแส และสถานะประจุภายใต้สภาวะการชาร์จและคายประจุที่แตกต่างกัน [2], [3]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของแบตเตอรี่โดยไม่จำเป็นต้องทดสอบแบตเตอรี่จริงในทุกสภาวะ แบบจำลองแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็นแบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมี แบบจำลองเชิงประจักษ์ และแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า โดยแบบจำลองวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Model: ECM) ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถกำหนดพารามิเตอร์จากข้อมูลการทดลอง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมจำลองและระบบควบคุมได้ [4], [5], [6] แบบจำลองอันดับหนึ่งซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และวงจรความต้านทาน-ตัวเก็บประจุ สามารถอธิบายพฤติกรรมแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะชั่วคราวได้ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่ด้วย MATLAB/Simulink รวมถึงการประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่ [7], [8], [9]

แม้แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งจะได้รับการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานจำลองและระบบควบคุม อย่างไรก็ตาม ความสามารถของแบบจำลองในการแทนพฤติกรรมของแบตเตอรี่จริงยังขึ้นอยู่กับวิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไขการใช้งาน ดังนั้น การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลจากการทดลองจริงภายใต้เงื่อนไขเดียวกันจึงมีความสำคัญ เพื่อประเมินทั้งความสามารถและข้อจำกัดของแบบจำลองในการประยุกต์ใช้งานจริง [10], [11]

อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของแบตเตอรี่จริงได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความต้านทานภายในที่เปลี่ยนแปลงตามสถานะประจุ อัตราการคายประจุ ความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลต์ และความสูญเสียในวงจรจริง [12], [13], [14] ดังนั้น แม้แบบจำลองอันดับหนึ่งจะมีข้อดีด้านความเรียบง่ายและเหมาะสมสำหรับการจำลอง แต่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบกับผลการทดลองจริงเพื่อประเมินความสามารถในการแทนพฤติกรรมของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง นอกจากนี้ การประเมินความถูกต้องควรพิจารณาทั้งการเปรียบเทียบแนวโน้มของผลลัพธ์และค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสโพลต์ และสถานะประจุ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่กำหนดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าให้แปรผันตามสถานะประจุ และนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นได้พัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสโพลต์ และสถานะประจุของแบตเตอรี่จริงภายใต้สภาวะการคายประจุ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง การศึกษานี้มุ่งประเมินความสามารถของแบบจำลองในการสะท้อนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ รวมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink และพัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสโพลต์ และสถานะประจุภายใต้สภาวะการคายประจุ
3. เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองจริง รวมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยและข้อจำกัดที่ส่งผลต่อความแตกต่างของผลลัพธ์

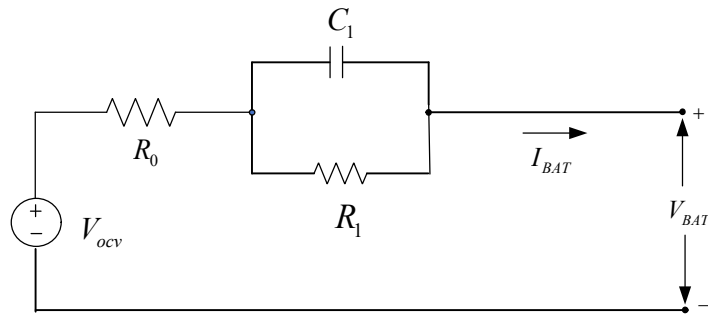
1.2 ข้อสมมติและข้อจำกัดของแบบจำลอง

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ด้วยโครงสร้างวงจรที่เรียบง่ายและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในการจำลอง ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองจึงอยู่ภายใต้ข้อสมมติที่ว่า พฤติกรรมแรงดันของแบตเตอรี่สามารถอธิบายได้ด้วยแรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และวงจรความต้านทาน-ตัวเก็บประจุหนึ่งชุด โดยกำหนดให้พารามิเตอร์หลักของแบบจำลองแปรผันตามสถานะประจุของแบตเตอรี่

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ยังไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิ การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ Hysteresis และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามอัตราการคายประจุอย่างละเอียด ดังนั้น ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจึงควรตีความภายใต้ขอบเขตและเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดในงานวิจัยนี้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่นี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการลดลงของแรงดันและการทำงานของแบตเตอรี่ ส่วนนี้นำเสนอหลักการของแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งที่ใช้แทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยอธิบายองค์ประกอบของวงจร ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด สถานะประจุ ความต้านทานภายใน และการตอบสนองแบบพลวัตของวงจรความต้านทาน-ตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 1 วงจรแบบจำลองสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่

2.1 วงจรแบบจำลองสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่

วงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่แสดงดังรูปที่ 1 โดยภายในวงจรประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ตัวต้านทานภายใน R_0 , R_1 ซึ่งใช้แทนการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน และตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งใช้แทนคุณสมบัติการเก็บประจุของแบตเตอรี่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการที่ (1) ใช้ในการคำนวณแรงดันที่แบตเตอรี่ $V_{BAT}(t)$ ที่สามารถจ่ายให้โหลดได้จริง โดยพิจารณาจากแรงดันวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, OCV) ของแบตเตอรี่ $V_{OCV}(t)$ และการลดลงของแรงดันจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ความต้านทานของสายไฟ และการสูญเสียแรงดันอื่น ๆ แรงดันวงจรเปิดวงจรสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{BAT}(t) = V_{OCV}(t) - V_1(t) - V_0(t) \quad (1)$$

โดยที่ $V_{BAT}(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวงจรแบตเตอรี่ $V_{OCV}(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแบตเตอรี่ $V_1(t)$ คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่ง และ $V_0(t)$ คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานตัวที่หนึ่ง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้กระแส มีค่าเป็นบวกในกรณีการคายประจุของแบตเตอรี่ และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการทดสอบมาจากงานวิจัยของ Yao และคณะ [15]

ค่าของแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มีผลกระทบจากกระแสที่ไหลผ่านโหลด $I_{Load}(t)$ และตัวต้านทาน $R_1(t)$ ดังนั้น การคำนวณค่าแรงดันในช่วงเวลาถัดไป $V_1(t+1)$ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_1(t+1) = \int \left(\frac{I_{Load}(t)}{C_1(t)} - \frac{V_1(t)}{C_1(t) \times R_1(t)} \right) dt \quad (2)$$

โดยที่ $V_1(t+1)$ คือ แรงดันตกคร่อมความต้านทานและตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่ง $C_1(t)$ คือ ตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่ง $R_1(t)$ คือ ความต้านทานชุดที่หนึ่ง และ $I_{Load}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าโหลดที่เกิดขึ้นในวงจรแบตเตอรี่

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ d_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $R_0(t)$ ตามสมการที่ (3)

สัมประสิทธิ์	ค่า
d_0	-0.04868
d_1	0.2129

สัมประสิทธิ์	ค่า
d_2	-0.3831
d_3	0.3659
d_4	-0.1996
d_5	0.06241
d_5	-0.01078
d_5	0.002851

ในทำนองเดียวกัน การคำนวณค่าความต้านทานเชิงเส้น $R_0(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่สัมพันธ์กับค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าตามค่าของกระแสที่ไหลผ่าน และค่า $R_0(t)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$R_0(t) = (d_0 \times SoC^7(t)) + (d_1 \times SoC^6(t)) + (d_2 \times SoC^5(t)) + (d_3 \times SoC^4(t)) + (d_4 \times SoC^3(t)) + (d_5 \times SoC^2(t)) + (d_6 \times SoC(t)) + d_7 \quad (3)$$

โดยที่ $R_0(t)$ คือ ค่าความต้านทานภายในตัวที่หนึ่ง d คือ ค่าคงที่ของแบตเตอรี่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และ $SoC(t)$ คือ สถานะประจุเหลืออยู่ของแบตเตอรี่

สมการที่ (4) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า $V_0(t)$ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า $I_{Load}(t)$ ที่ไหลผ่านความต้านทาน $R_0(t)$ โดยอ้างอิงจากสมการนี้สามารถใช้ในการคำนวณแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทาน $R_0(t)$ ค่าความต้านทานภายในตัวที่หนึ่ง และค่า $V_0(t)$ แสดงดังนี้

$$V_0(t) = I_{Load}(t) \times R_0(t) \quad (4)$$

โดยที่ $V_0(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานตัวที่หนึ่ง $I_{Load}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรแบตเตอรี่เมื่อมีการจ่ายโหลด และ $R_0(t)$ คือ ค่าความต้านทานภายในตัวที่หนึ่ง

สมการที่ (5) ใช้คำนวณการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่เมื่อเทียบกับความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ โดยค่าสถานะประจุ $SoC(t)$ คำนวณได้จาก

$$SoC(t) = SoC_0 - \int \frac{100}{a^u \times 3600} I_{Load}(t) dt \quad (5)$$

โดยที่ $SoC(t)$ คือ สถานะประจุเหลืออยู่ของแบตเตอรี่ SoC_0 คือ ค่าสถานะประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่ และ a^u คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah) สถานะประจุของแบตเตอรี่ถูกคำนวณด้วยวิธีการสะสมประจุไฟฟ้าจากค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาศัยค่าความจุที่กำหนดของแบตเตอรี่และสถานะประจุเริ่มต้นเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลอง [16], [17]

แรงดันวงจรเปิด $V_{OCV}(t)$ ซึ่งเป็นแรงดันที่วัดได้เมื่อไม่มีโหลดเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยมีการแปลงตามสถานะประจุของแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$V_{ocv}(t) = (K_0 \times SoC^5(t)) + (K_1 \times SoC^4(t)) + (K_2 \times SoC^3(t)) + (K_3 \times SoC^2(t)) + (K_4 \times SoC(t)) + K_5$$

(6)

โดยที่ $V_{ocv}(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแบตเตอรี่ และ K คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ K_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $V_{ocv}(t)$ ตามสมการที่ (6)

สัมประสิทธิ์	ค่า
K_0	5.062
K_1	-15.72
K_2	18.57
K_3	-9.559
K_4	2.508
K_5	3.333

การคำนวณค่าความต้านทาน $R_1(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานในวงจรสมมูลของแบตเตอรี่โดยใช้สมการ Polynomial ในการคำนวณโดยขึ้นอยู่กับสองตัวแปรหลัก ได้แก่ ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่และค่าคงที่ โดยค่าของ $R_1(t)$ คำนวณได้จาก

$$R_1(t) = (a_0 \times SoC^8(t)) + (a_1 \times SoC^7(t)) + (a_2 \times SoC^6(t)) + (a_3 \times SoC^5(t)) + (a_4 \times SoC^4(t)) + (a_5 \times SoC^3(t)) + (a_6 \times SoC^2(t)) + (a_7 \times SoC(t)) + a_8$$

(7)

โดยที่ $R_1(t)$ คือ ค่าความต้านทานภายในของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ และ a คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ a_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $R_1(t)$ ตามสมการที่ (7)

สัมประสิทธิ์	ค่า
a_0	0.2345
a_1	-1.438
a_2	3.497
a_3	-4.409
a_4	3.135
a_5	-1.277
a_6	0.2909
a_7	-0.03471
a_8	0.002402

สุดท้าย ค่าตัวเก็บประจุ $C_1(t)$ ซึ่งเป็นค่าตัวเก็บประจุในวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ โดยใช้สมการ Polynomial เหมือนความต้านทาน $R_1(t)$ ในการคำนวณโดยขึ้นอยู่กับสองตัวแปรหลัก ได้แก่ ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่และค่าคงที่ และค่า $C_1(t)$ คำนวณได้จาก

$$C_1(t) = (c_0 \times 10^7 \times SoC^8(t)) + (c_1 \times 10^7 \times SoC^7(t)) + (c_2 \times 10^7 \times SoC^6(t)) + (c_3 \times 10^7 \times SoC^5(t)) + (c_4 \times 10^7 \times SoC^4(t)) + (c_5 \times 10^7 \times SoC^3(t)) + (c_6 \times 10^5 \times SoC^2(t)) + (c_7 \times 10^5 \times SoC(t)) + c_8 \quad (8)$$

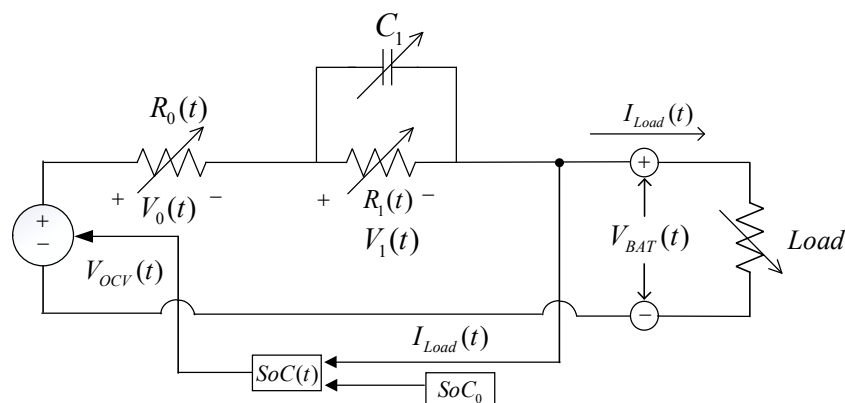
โดยที่ C_1 คือ ความจุที่เกิดจากการแพร่กระจายของไอออน และ c คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ c_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $C_1(t)$ ตามสมการที่ (8)

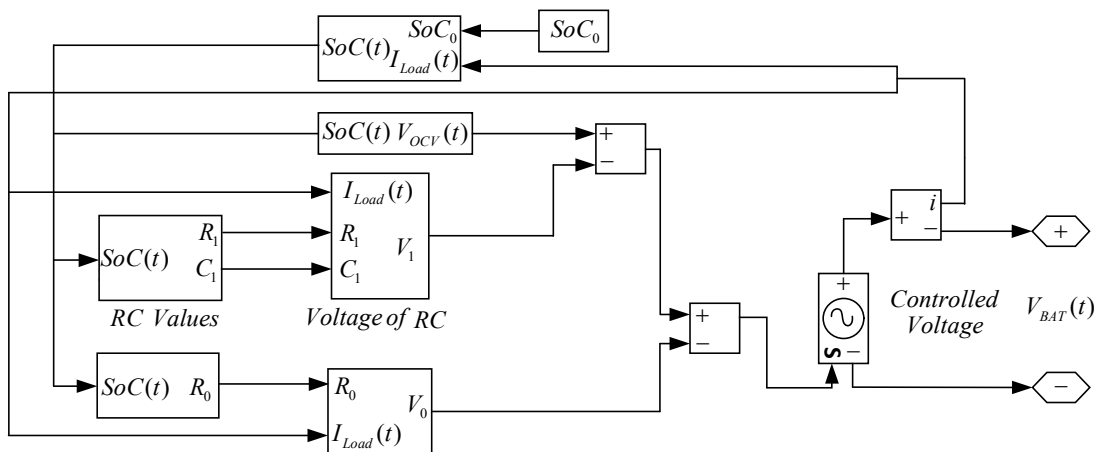
สัมประสิทธิ์	ค่า
c_0	1.139
c_1	-4.641
c_2	7.585
c_3	-6.355
c_4	2.875
c_5	-6.515
c_6	3.539
c_7	1.356
c_8	-107.2

2.2 วงจรภาพรวมแบบจำลองแบตเตอรี่ลิเทียมของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่งดังรูปที่ 2 ถูกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดันแบตเตอรี่เมื่อมีโหลดเชื่อมต่อ ซึ่งคำนึงถึงแรงดันวงจรเปิด $V_{OCV}(t)$ และแรงดันตกคร่อมที่เกิดจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ แบบจำลองนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{OCV}(t)$ ซึ่งแทนด้วยค่าค่าแรงดันของแบตเตอรี่ในสภาวะเปิดวงจร ความต้านทานภายในแบ่งออกเป็น $R_0(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะประจุของแบตเตอรี่ และ $R_1(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะประจุของแบตเตอรี่ โดยมีตัวเก็บประจุ $C_1(t)$ เป็นตัวแทนของพฤติกรรมการตอบสนองต่อโหลด การทำงานของวงจรนี้จะช่วยให้สามารถจำลองแรงดันของแบตเตอรี่ $V_{BAT}(t)$ ได้อย่างแม่นยำเมื่อเชื่อมต่อกับโหลด



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่ง



รูปที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

2.3 วงจรภาพรวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่โดย MATLAB/Simulink

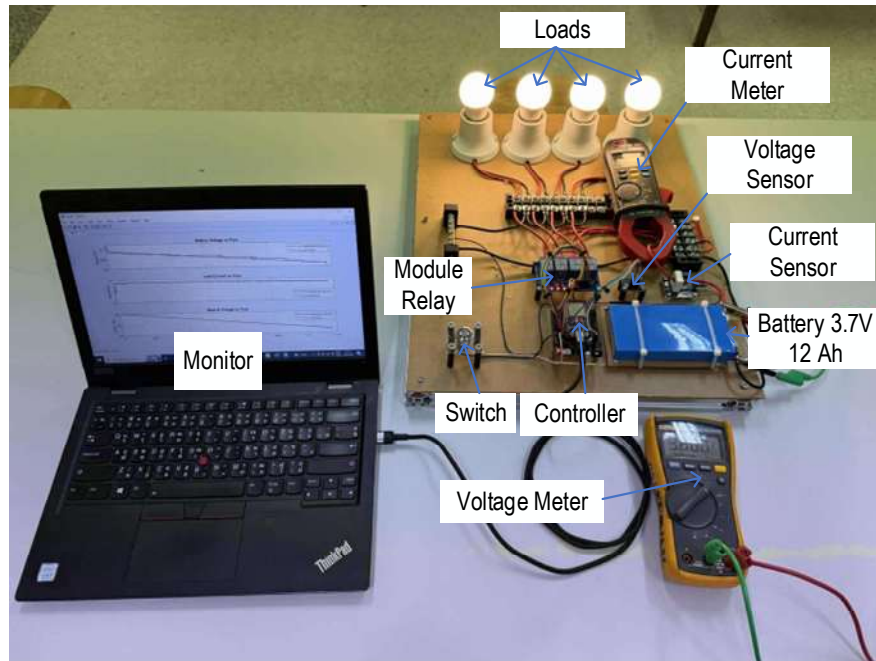
แบบจำลองสมการวงจรเทียบเท่าของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ (Battery Equivalent Circuit Model, ECM) แสดงในรูปที่ 3 ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยแบบจำลองนี้ประกอบด้วยแรงดันเปิดวงจรที่ขึ้นกับสถานะประจุ ร่วมกับเครือข่ายค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุซึ่งใช้แทนการตอบสนองแบบพลวัต (Dynamic Response) และความต้านทานภายในที่ใช้แทนการสูญเสียแบบโอห์มมิก (Ohmic Loss) แรงดันรวมจากองค์ประกอบต่าง ๆ จะได้แรงดันที่ขาออกของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการทำงานทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะชั่วคราวของการคายประจุได้อย่างแม่นยำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำไปพัฒนาในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองพฤติกรรมแรงดันและการเปลี่ยนแปลงของสถานะประจุภายใต้สภาวะการคายประจุที่กำหนด โดยโครงสร้างของแบบจำลองเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุ แรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และพารามิเตอร์ของวงจร RC เพื่อใช้คำนวณแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ตามเวลา

3. การออกแบบฮาร์ดแวร์เพื่อใช้ในการทดสอบของแบตเตอรี่

รูปที่ 4 แสดงชุดทดลองฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจริง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานจริงของแบตเตอรี่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในงานวิจัย ระบบทดสอบประกอบด้วยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาด 3.7 V ความจุ 12 Ah ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับโหลดที่กำหนด ระบบควบคุมการเชื่อมต่อโหลดด้วยรีเลย์ที่สั่งงานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ขณะเดียวกันแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ถูกตรวจวัดและบันทึกอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการคายประจุ ข้อมูลที่ได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณและเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง MATLAB/Simulink ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นเดียวกัน

ในระบบทดลองมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดกระแสและแรงดันเพื่อตรวจวัดพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระหว่างการทำงาน โดยค่าที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์และส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ (Monitor) เพื่อบันทึกและประมวลผลข้อมูล นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือวัดภายนอก เช่น แอมป์มิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ สำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่วัดได้จากระบบ ข้อมูลที่บันทึกไว้จะถูกใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการจำลอง เพื่อประเมินความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลองแบตเตอรี่ในสภาวะจริง ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลทางคณิตศาสตร์และการพัฒนาระบบจัดการพลังงานในอนาคต



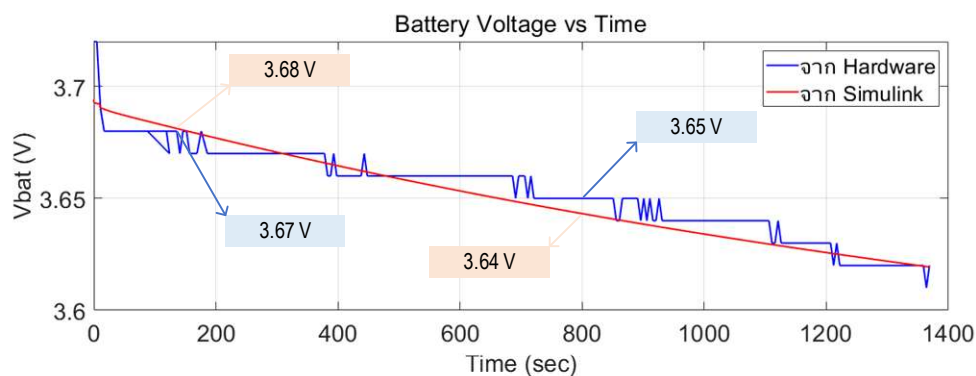
รูปที่ 4 ชุดทดลองฮาร์ดแวร์สำหรับการทดสอบระบบแบตเตอรี่และโหลด

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

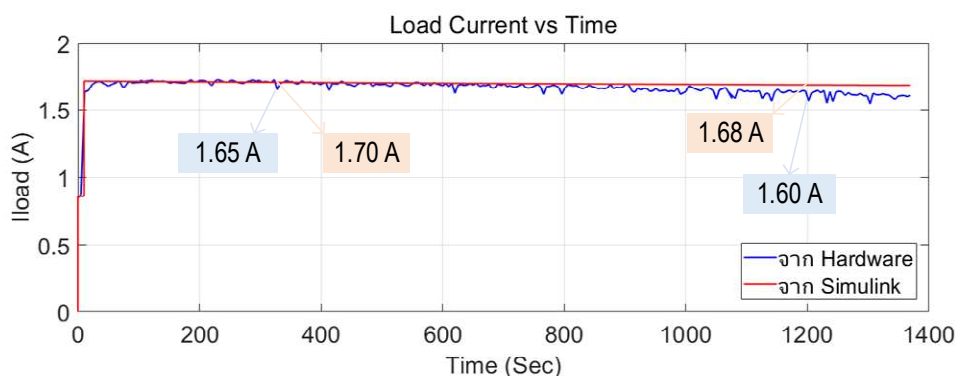
การทดลองเริ่มต้นจากการกำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่ จากนั้นเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้ากับโหลดและเริ่มบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสโหลดตามช่วงเวลาที่กำหนด ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสถานะประจุและเปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการทดลอง

4.1 การเปรียบเทียบแรงดัน

ผลการทดลองพบว่า แรงดันของแบตเตอรี่จริงลดลงมากกว่าในแบบจำลอง แม้เริ่มต้นที่ค่าเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแรงดันจากการทดลองและแรงดันจากแบบจำลองมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการคายประจุในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่วัดได้จากระบบจริงมีความผันผวนมากกว่าผลจากแบบจำลอง ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ไม่ได้รวมอยู่ในแบบจำลองโดยละเอียด เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความต้านทานของสายไฟและจุดเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายใน และลักษณะการทำงานของโหลด



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบแรงดันแบตเตอรี่ระหว่างการทดสอบด้วยฮาร์ดแวร์และแบบจำลองใน MATLAB/Simulink



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการตอบสนองของกระแสไหลระหว่างการทดสอบด้วยฮาร์ดแวร์และแบบจำลองใน MATLAB/Simulink

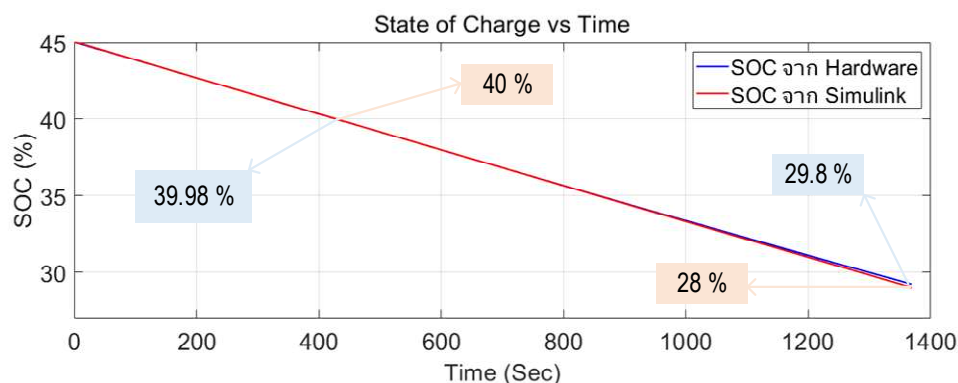
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ระหว่างผลการทดลองจริงและผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink พบว่าแรงดันไฟฟ้าจากทั้งสองกรณีมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการคายประจุ โดยผลการจำลองลดลงจากประมาณ 3.68 V เป็น 3.64 V ขณะที่ผลการทดลองจริงอยู่ในช่วงประมาณ 3.67–3.65 V ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนแนวโน้มการลดลงของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการคายประจุที่ทดสอบได้

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองจริงมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเป็นช่วงมากกว่าผลการจำลอง ซึ่งอาจเกิดจากพฤติกรรมของแบตเตอรี่จริงที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายใน การตอบสนองของโหลด และความสูญเสียในสายไฟและจุดเชื่อมต่อ ขณะที่แบบจำลองอันดับหนึ่งใช้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับ SoC เป็นหลักและไม่ได้รวมผลกระทบดังกล่าวอย่างละเอียด ดังนั้น ความแตกต่างของผลลัพธ์จึงสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองในการแทนพฤติกรรมทางกายภาพของแบตเตอรี่จริง

4.2 การเปรียบเทียบกระแส

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบกระแสไหลระหว่างการทดลองจริงและผลการจำลอง พบว่ากระแสไหลจากทั้งสองกรณีมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยหลังจากช่วงเริ่มต้นของการทำงาน ผลการจำลองแสดงค่ากระแสไหลประมาณ 1.70 A ขณะที่ค่าที่วัดได้จากระบบจริงอยู่ในช่วงประมาณ 1.60–1.65 A โดยมีความแตกต่างประมาณ 0.05–0.10 A ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนว่าพฤติกรรมของโหลดและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบจริงส่งผลต่อกระแสที่เกิดขึ้น ซึ่งยังไม่ได้ถูกแทนอย่างละเอียดในแบบจำลอง

การแกว่งตัวของกระแสจากการทดลองจริงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ค่อนข้างคงที่จากแบบจำลองอาจเกิดจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ความต้านทานของสายไฟ พฤติกรรมของโหลด และความไม่คงที่ของระบบวัด ซึ่งไม่ได้ถูกจำลองอย่างละเอียดในแบบจำลองอันดับหนึ่ง นอกจากนี้ การลดลงของกระแสในช่วงท้ายของการทดลองอาจสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแบตเตอรี่และคุณสมบัติของโหลดในสภาวะจริง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าระดับประจุแบตเตอรี่ (SoC) จากการวัดฮาร์ดแวร์และการจำลองด้วย MATLAB/Simulink แสดงผลใกล้เคียงกันตลอดเวลา

4.3 การเปรียบเทียบสถานะประจุ

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบสถานะประจุ (SoC) ระหว่างผลการทดลองจริงและผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink พบว่าทั้งสองกรณีมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการคายประจุ โดยในช่วงเวลาประมาณ 400 s ค่า SoC จากการทดลองจริงเท่ากับ 39.98% ขณะที่ผลการจำลองมีค่าประมาณ 40.0% คิดเป็นความแตกต่างประมาณ 0.02 จุดเปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันสูงในช่วงต้นของการทดสอบ เมื่อเวลาการคายประจุเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 s ค่า SoC จากการทดลองจริงลดลงเหลือประมาณ 29.8% ขณะที่ผลการจำลองมีค่าประมาณ 28.0% หรือมีความแตกต่างประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปอาจเกิดจากผลสะสมของความคลาดเคลื่อนในการประมาณ SoC รวมถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ความต้านทานภายใน และความสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจริง ซึ่งไม่ได้ถูกพิจารณาอย่างละเอียดในแบบจำลอง

ผลการเปรียบเทียบสถานะประจุแสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ ผลจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในระดับสูง โดยที่เวลาประมาณ 400 s ค่าสถานะประจุจากการทดลองเท่ากับ 39.98% ขณะที่ผลการจำลองมีค่าประมาณ 40.0% อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาการคายประจุเพิ่มขึ้น ความแตกต่างระหว่างผลทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาประมาณ 1,200 s ผลการทดลองมีค่า 29.8% ขณะที่ผลการจำลองมีค่า 28.0% หรือมีความแตกต่างประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการสะสมของความคลาดเคลื่อนตามระยะเวลาการทำงาน ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดในการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองและปัจจัยทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทำงาน

4.4 การอภิปรายผล

โดยภาพรวม แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสามารถสะท้อนแนวโน้มหลักของแรงดัน กระแส และสถานะประจุของแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำหนดพารามิเตอร์ให้ขึ้นกับสถานะประจุเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอสำหรับการแทนพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระบบจริง เนื่องจากพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่สามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ อัตราการคายประจุ สภาพการใช้งาน และการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ ความต้านทานของสายไฟ จุดเชื่อมต่อ และลักษณะของโหลดจริงอาจส่งผลต่อค่าที่ตรวจวัดได้ ดังนั้น ความสามารถของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นควรตีความภายใต้ขอบเขตของเงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบบจำลอง และนำไปพัฒนาในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองพฤติกรรมของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการคายประจุ จากนั้นได้พัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไหล และสถานะประจุของแบตเตอรี่ขนาด 3.7 V ความจุ 12 Ah เพื่อนำมาใช้ตรวจสอบผลการจำลอง ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไหล และสถานะประจุได้สอดคล้องกับผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยแรงดันจากแบบจำลองและการทดลองมีแนวโน้มลดลงในทิศทางเดียวกัน ขณะที่กระแสไหลมีความแตกต่างประมาณ 0.05–0.10 A สำหรับสถานะประจุ พบว่าความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการคายประจุ และมีค่าประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ที่เวลาประมาณ 1,200 s ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสามารถใช้แทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ได้ภายใต้ขอบเขตของเงื่อนไขการทดลอง โดยมีข้อได้เปรียบด้านโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการจำลองและการศึกษาระบบจัดการพลังงาน อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองที่ยังไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามอัตราการคายประจุ การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และความสูญเสียในระบบจริง

สำหรับการศึกษาต่อไป ผู้วิจัยจะพัฒนาแบบจำลองให้สามารถพิจารณาผลของอุณหภูมิ อัตราการคายประจุ และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามสภาวะการทำงาน รวมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองภายใต้รูปแบบโหลดและเงื่อนไขการใช้งานที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มขอบเขตและความน่าเชื่อถือของการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองในระบบแบตเตอรี่จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wakihara, M. (2001). Recent developments in lithium on batteries. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 33(4), 109-134.
- [2] Kim, T., Song, W., Son, D. Y., Ono, L. K., & Qi, Y. (2019). Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(7), 2942-2964.
- [3] Sakti, A., Gallagher, K. G., Sepulveda, N., Uckun, C., Vergara, C., de Sisternes, F. J., ... & Botterud, A. (2017). Enhanced representations of lithium-ion batteries in power systems models and their effect on the valuation of energy arbitrage applications. *Journal of Power Sources*, 342, 279-291.
- [4] He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, 4(4), 582-598.
- [5] Nejad, S., Gladwin, D. T., & Stone, D. A. (2016). A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery states. *Journal of Power Sources*, 316, 183-196.

- [6] Zhang, L., Peng, H., Ning, Z., Mu, Z., & Sun, C. (2017). Comparative research on RC equivalent circuit models for lithium-ion batteries of electric vehicles. *Applied Sciences*, 7(10), 1002.
- [7] Khayamy, M., Nasiri, A., & Okoye, O. (2020). Development of an equivalent circuit for batteries based on a distributed impedance network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(6), 6119-6128.
- [8] Baveja, R., Bhattacharya, J., Panchal, S., Fraser, R., & Fowler, M. (2023). Predicting temperature distribution of passively balanced battery module under realistic driving conditions through coupled equivalent circuit method and lumped heat dissipation method. *Journal of Energy Storage*, 70, 107967.
- [9] Kim, J., & Kowal, J. (2022). Development of a Matlab/Simulink model for monitoring cell state-of-health and state-of-charge via impedance of lithium-ion battery cells. *Batteries*, 8(2), 8.
- [10] Nemes, R., Ciornei, S., Ruba, M., Hedesiu, H., & Martis, C. (2019, May). Modeling and simulation of first-order Li-Ion battery cell with experimental validation. In *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [11] Lai, X., Gao, W., Zheng, Y., Ouyang, M., Li, J., Han, X., & Zhou, L. (2019). A comparative study of global optimization methods for parameter identification of different equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 295, 1057-1066.
- [12] Sang, V. T. D., Duong, Q. H., Zhou, L., & Arranz, C. F. (2024). Electric vehicle battery technologies and capacity prediction: a comprehensive literature review of trends and influencing factors. *Batteries*, 10(12), 451.
- [13] Liu, G., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Han, X. (2014). Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 116(2), 1001-1010.
- [14] Hruska, L. W., & Savinell, R. F. (1981). Investigation of factors affecting performance of the iron-redox battery. *Journal of the Electrochemical Society*, 128(1), 18-25.
- [15] Yao, L. W., Aziz, J. A., Kong, P. Y., & Idris, N. R. N. (2013, November). Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/Simulink. In *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1729-1734). IEEE.
- [16] Meng, J., Ricco, M., Luo, G., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Stroe, A. I., & Teodorescu, R. (2017). An overview and comparison of online implementable SOC estimation methods for lithium-ion battery. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(2), 1583-1591.
- [17] How, D. N., Hannan, M. A., Lipu, M. H., & Ker, P. J. (2019). State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review. *IEEE Access*, 7, 136116-136136.