

การสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต Modeling of Hydrogen Fuel Cell Stack Based on Manufacturer Information

กฤษฎา ทองอร่าม¹ กองพันธ์ อารีรักษ์¹ อภิชัย สุธะพันธ์^{2*} และ จักรกริช ภักดีโต³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author : apichai.suya@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจนจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยข้อมูลเฉพาะจากบริษัทผู้ผลิตสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในสมการกึ่งประจักษ์ของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันและผลการตอบสนองของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนให้ผลที่สอดคล้องและตรงกับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน, เส้นโค้งโพลาริเซชัน, จักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

Abstract

The study regarding the production and utilization of electrical energy from hydrogen requires a mathematical model of hydrogen fuel cells. Therefore, this article presents the derivation of a fuel cell model based on the specifications provided by manufacturers, which are used to estimate the key parameters in the semi-empirical equations of the fuel cell. The accuracy of the proposed model is validated by comparing the polarization curves and the dynamic response of a hydrogen-powered electric bicycle system through intensive time-domain simulation using MATLAB/SIMULINK. The results demonstrate that the proposed model can provide the consistent and accurate results compared with the built-in blocks in SimPowerSystem™. Therefore, the model is precise and can be effectively applied in future research.

Keywords: Mathematical Model, Hydrogen Fuel Cell, Polarization Curve, Hydrogen-Powered Electric Bicycle

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาลึกลับที่หลายประเทศทั่วโลกกำลังเผชิญ สาเหตุหลักของปัญหาดังกล่าวมาจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความต้องการนำพลังงานสะอาดมาใช้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในปัจจุบันและอนาคต หนึ่งในพลังงานสะอาดที่ได้รับความสนใจได้แก่ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจน เนื่องจากพลังงานไฮโดรเจนมีความหนาแน่นสูงเมื่อเทียบกับพลังงานชนิดอื่น ๆ โดยการผลิตพลังงานไฟฟ้างานนี้จะอาศัยเซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่แปลงพลังงานจากไฮโดรเจนและสารออกซิไดซ์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงโดยมีเพียงน้ำและความร้อนเป็นผลพลอยได้และไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ [1-2] เมื่อพิจารณาไปที่ภาคส่วนคมนาคมและการขนส่ง การนำพลังงานไฮโดรเจนมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบขับเคลื่อนจึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานไฮโดรเจนได้ถูกนำมาใช้ในยานพาหนะหลากหลายประเภท เช่น รถบรรทุก เครื่องบินเรือ และจักรยานไฟฟ้า เป็นต้น [3] ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจนจึงเป็นส่วนที่สำคัญในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนที่ใช้พลังงานไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปการศึกษาวิจัยดังกล่าวจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองของระบบ ด้วยเหตุนี้บทความจึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองกึ่งประจักษ์ (semi-empirical model) แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (analytical model) และแบบจำลองเชิงกลไก (mechanistic model) [4-5] อย่างไรก็ตามบทความนี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบกึ่งประจักษ์ เนื่องจากเป็นแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (simplified hydrogen fuel cell model) ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ด้วยการนำข้อมูลเฉพาะจากผู้ผลิตมาใช้ร่วมกับสมการกึ่งประจักษ์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน โดยไม่จำเป็นต้องดำเนินการทดสอบจริง [6] อีกทั้งยังมีจุดเด่นในเรื่องของโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลจากผู้ผลิต ในขณะที่ยังคงตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จะอาศัยการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันและผลการตอบสนองของระบบจักษ์ยานไฟฟ้าจากการใช้แบบจำลองที่ได้กับชุดบล็อกสำเร็จรูปในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีความถูกต้อง ดังนั้นแบบจำลองที่จะถูกนำไปต่อยอดในการประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนจักษ์ยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไปในอนาคต

บทความนี้ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายการหาแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ส่วนที่ 3 นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พร้อมทั้งการอภิปรายผล และส่วนที่ 4 เป็นสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

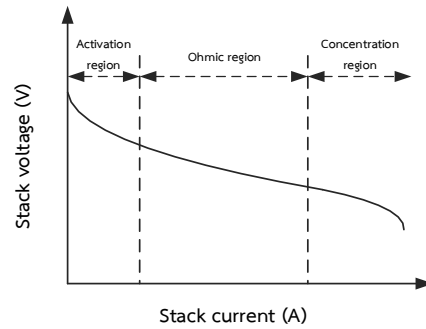
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในบทความนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการนำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่มีการพิจารณาถึงพฤติกรรมที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าของโพลและกระแสสูญเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง [7] และส่วนที่ 2 เป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต โดยบทความนี้เลือกใช้เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500 จากบริษัท Horizon Fuel cell Technologies [8] มีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ 500 W ซึ่งการหาแบบจำลองแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

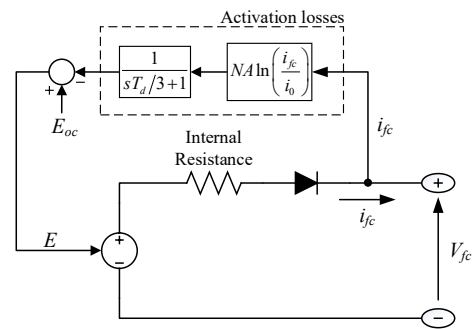
2.1 แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

พฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถอธิบายได้ด้วยเส้นโค้งโพลาริเซชันทั่วไป (typical polarization) แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะมีการสูญเสียอยู่ 3 ย่าน ได้แก่ การสูญเสียในย่านกระตุ้น (activation region) การสูญเสียในย่านความต้านทานภายใน (ohmic region) และการสูญเสียในย่านความเข้มข้น (concentration region) [9-10] ซึ่งส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีค่าไม่คงที่ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้งานจริงจะถูกออกแบบและควบคุมเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียในย่านความเข้มข้น เนื่องจากการทำงานที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินขีดจำกัดจะส่งผลให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย [5] ดังนั้นบทความนี้จะไม่พิจารณาการสูญเสียในย่านดังกล่าว

แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งวงจรดังกล่าวประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิง (E_{oc}) การสูญเสียในย่านกระตุ้นที่ถูกแทนด้วยชุดบล็อกในกรอบเส้นประสีดำ และการสูญเสียที่เกิดจากความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งถูกแทนด้วยค่าความต้านทานภายใน (internal resistance) โดยสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 เส้นโค้งโพลาริเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของแบบจำลองอย่างง่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

$$V_{fc} = E_{oc} - V_{act} - V_{ohmic} \quad (1)$$

โดยที่

- V_{fc} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิง (V)
- E_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิง (V)
- V_{act} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสูญเสียในย่านกระตุ้น (V)
- V_{ohmic} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสูญเสียจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (V)

จากรูปที่ 2 จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) หรือผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราว (transient response) จากการสูญเสียในย่านกระตุ้นจะถูกจำลองด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 1 ดังพจน์ $\frac{1}{sT_d/3+1}$ เพื่อใช้ในการห้วงเวลาขณะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า [6] โดยที่ T_d คือระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (settling time) แต่อย่างไรก็ตามเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว (steady-state response) จากการสูญเสียในย่านกระตุ้นเท่านั้น ดังนั้นพจน์ดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจากการสูญเสียในย่านกระตุ้นในสภาวะอยู่ตัวแสดงดังสมการที่ (2) และแรงดันไฟฟ้าจากการสูญเสียจากความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนแสดงดังสมการที่ (3)

$$V_{act} = NA \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) \quad (2)$$

$$V_{ohmic} = R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (3)$$

โดยที่

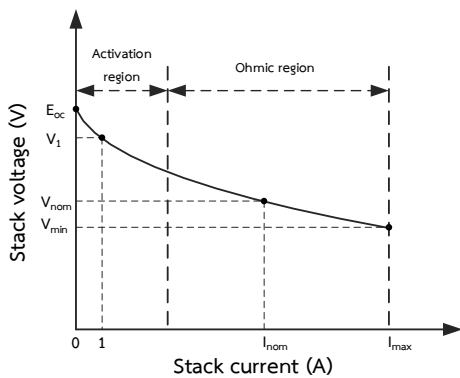
- N คือ จำนวนเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิง
 A คือ ค่าความชันของทาทเปล (V)
 i_{fc} คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (A)
 i_0 คือ กระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง (A)
 R_{ohm} คือ ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง (Ω)

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (2) และสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (1) จะได้สมการแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในสถานะอยู่ตัวแสดงได้ดังสมการที่ (4) ดังนี้

$$V_{fc} = E_{oc} - NA \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (4)$$

2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต

จากแบบจำลองที่ได้ดังสมการที่ (4) จะพบว่ามีพารามิเตอร์ E_{oc} , NA , R_{ohm} และ i_0 ที่จำเป็นต้องทราบหรือดำเนินการประมาณค่า ซึ่งค่าพารามิเตอร์จำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถประมาณได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชันโดยอาศัยข้อมูลจากผู้ผลิตดังแสดงได้ในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยจุดการทำงานทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้า 1 A (V_I) แรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานปกติ (V_{nom}) และแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานกระแสไฟฟ้าสูงสุด (V_{min}) โดยค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่ได้ในแต่ละจุดทำงานมีทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ E_{oc} , V_I , V_{nom} , I_{nom} , V_{min} และ I_{max}



รูปที่ 3 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน [6]

เมื่อพิจารณาแบบจำลองในสมการที่ (4) ร่วมกับจุดการทำงานทั้ง 4 จุดจะสามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้จุดการทำงานต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (7)

$$V_I = E_{oc} - NA \ln(i_0) - R_{ohm} \quad (5)$$

$$V_{nom} = E_{oc} - NA \ln \left(\frac{I_{nom}}{i_0} \right) - R_{ohm} \cdot I_{nom} \quad (6)$$

$$V_{min} = E_{oc} - NA \ln \left(\frac{I_{max}}{i_0} \right) - R_{ohm} \cdot I_{max} \quad (7)$$

โดยที่

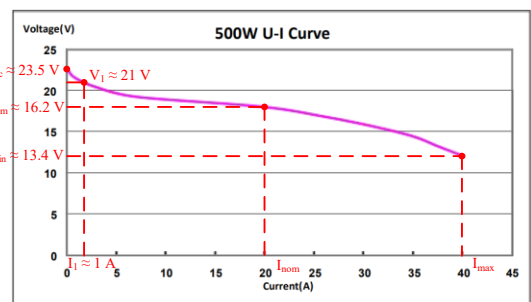
- V_{nom} คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานปกติ
 I_{nom} คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานปกติ
 V_{min} คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสสูงสุด
 I_{max} คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานสูงสุด
 V_I คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแส 1 A

ดังนั้นจากสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (7) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งได้แก่ NA , R_{ohm} และ i_0 แสดงได้ดังสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (10) โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์จำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้จากการประมาณค่าบนเส้นโค้งโพลาริเซชันซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการจากผู้ผลิต

$$NA = \frac{(V_I - V_{nom})(I_{max} - 1) - (V_I - V_{min})(I_{nom} - 1)}{\ln(I_{nom})(I_{max} - 1) - \ln(I_{max})(I_{nom} - 1)} \quad (8)$$

$$R_{ohm} = \frac{V_I - V_{nom} - NA \ln(I_{nom})}{I_{nom} - 1} \quad (9)$$

$$i_0 = \exp \left(\frac{V_I - E_{oc} + R_{ohm}}{NA} \right) \quad (10)$$



รูปที่ 4 เส้นโค้งโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500

เมื่อพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500 จากบริษัท Horizon Fuel cell Technologies ซึ่งมีเส้นโค้งโพลาริเซชันแสดงดังรูปที่ 4 จะสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

- $[E_{oc} (V), V_I (V)] = [23.5, 21]$
- $[I_{nom} (A), V_{nom} (V)] = [20, 16.2]$
- $[I_{max} (A), V_{min} (V)] = [40, 13.4]$

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์เฉพาะที่ได้ตั้งข้างต้นแทนลงในสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (10) จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ NA , R_{ohm} และ i_0 ในแบบจำลองได้ จากนั้นเมื่อนำค่าดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (4) จะได้แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (11) โดยแบบจำลองดังกล่าวจะได้รับการตรวจสอบความถูกต้องดังที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

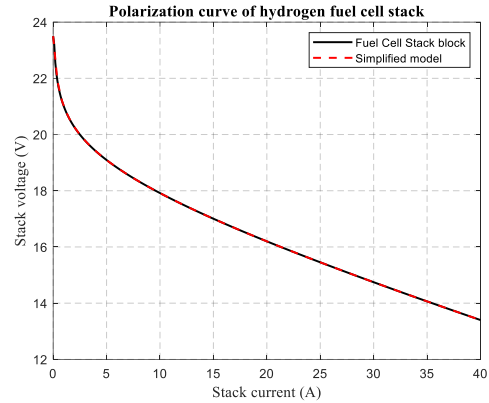
$$V_{fc} = 23.5 - 0.9156 \ln \left(\frac{i_{fc}}{0.0734} \right) - 0.1083 \cdot i_{fc} \quad (11)$$

3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในบทความนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้จากแบบจำลองกับชุดบล็อกสำเร็จรูปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนใน SimPowerSystem™ และกรณีที่ 2 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบโดยรวมเมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองร่วมกับระบบจักษุยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

3.1 การตรวจสอบเส้นโค้งโพลาริเซชัน

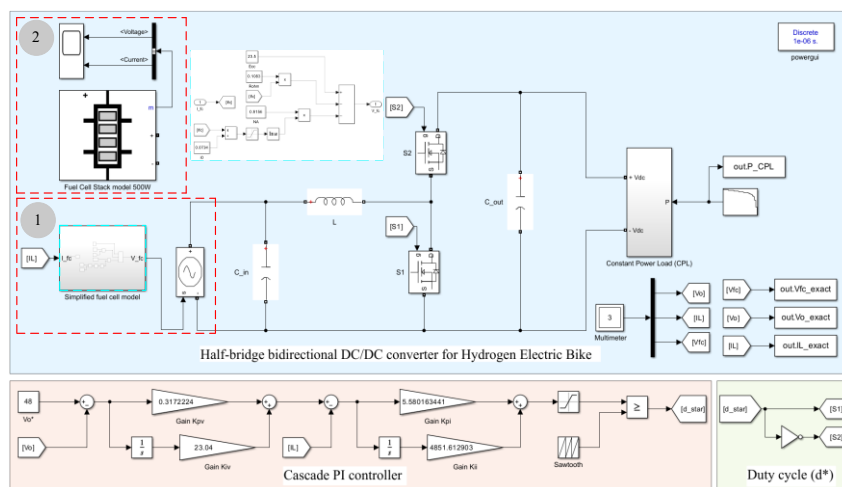
แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้ตั้งสมการที่ (11) ถูกนำมาใช้ในการสร้างเส้นโค้งโพลาริเซชันและเปรียบเทียบกับเส้นโค้งที่ได้จากชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™ โดยค่าพารามิเตอร์เฉพาะจะถูกกำหนดลงในชุดบล็อกดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า เส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้จากแบบจำลองให้ผลที่สอดคล้องและตรงกับชุดบล็อกสำเร็จรูปจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่มีความถูกต้องและสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในสภาวะอยู่ตัวได้



รูปที่ 5 เส้นโค้งโพลาริเซชันของแบบจำลองอย่างง่ายเปรียบเทียบกับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™

3.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองอย่างง่ายร่วมกับระบบจักษุยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

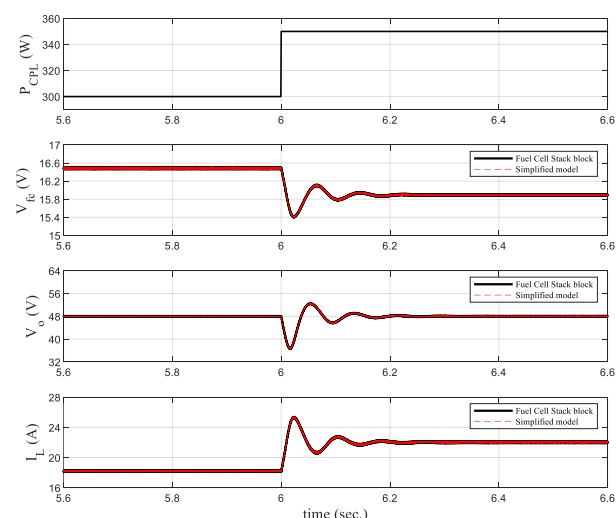
ระบบจักษุยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบ ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดิจิตอลเป็นดิจิตอลสองทิศทางที่มีตัวควบคุมฟีดแบ็คต่อเรียงกัน ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ และส่วนที่ 3 โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกแทนด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว [12] ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงได้ดังตารางที่ 1 สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องในกรณีที่ 2 นี้แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกนำมาสร้างเป็นชุดบล็อกเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบ (กรอบสีแดงหมายเลข 1) และจะถูกเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองเมื่อใช้ชุดบล็อกสำเร็จรูปของเซลล์เชื้อเพลิงใน SimPowerSystem™ (กรอบสีแดงหมายเลข 2) โดยการจำลองสถานการณ์ของระบบจักษุยานไฟฟ้าจะดำเนินการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 300 W เป็น 350 W ที่เวลา $t = 6$ วินาที ซึ่งการเปรียบเทียบผลการตอบสนองแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบจักษุยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบจํายานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_o	48 V	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
L ($\Delta I_L \leq 0.11A$)	4.7 mH	ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
C_o ($\Delta V_o \leq 0.24V$)	1600 μF	ค่าความจุไฟฟ้าทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรแปลงผัน
C_i ($\Delta V_i \leq 2.48V$)	1.5 μF	ค่าความจุไฟฟ้าทางฝั่งอินพุตของวงจรแปลงผัน
A_r	10	ค่ายอตของสัญญาณสามเหลี่ยม
K_{pv}	0.3172	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า [11]
K_{iv}	23.04	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า [11]
K_{pi}	5.5802	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า [11]
K_{ii}	4851.61	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า [11]



รูปที่ 7 ผลการตอบสนองของระบบจํายานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

จากรูปที่ 7 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้ดั่งสมการที่ (11) มีความสอดคล้องกับชุดบล็อกสำเร็จรูปทั้งในช่วงสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน โดยอาศัยข้อมูลจำเพาะจากบริษัทผู้ผลิตเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลองดังกล่าว ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ความต้านทานภายใน และค่าคงที่ทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งถูกนำมาใช้ในสมการแบบจำลองกึ่งประจักษ์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะอยู่ตัว โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม

MATLAB/SIMULINK แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™ ทั้งในการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงและผลการตอบสนองของระบบจํายานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน ดังนั้นแบบจำลองดังกล่าวที่ได้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจํายานไฟฟ้าเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Chang, Y. Qin, Y. Yin, J. Zhang, and X. Li, "Humidification strategy for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review," *Applied Energy*, vol. 230, Sep. 2018, pp. 643–662.
- [2] A. Sharma and R. Garg, "New Technology for Harnessing Energy: Future of Hydrogen," 2023 International Conference on Recent Trends in Electronics and Communication (ICRTEC), Mysore, India, 2023, pp. 1-7.
- [3] P. Fragiaco, M. Genovese, F. Piraino, O. Corigliano, and G. De Lorenzo, "Hydrogen-Fuel Cell Hybrid Powertrain: Conceptual Layouts and Current Applications," *Machines*, vol. 10, no. 12, art. 1121, Nov. 2022.
- [4] S. Hamdollahi and J. Luo, "A review on modeling of proton exchange membrane fuel cell," *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 29, no. 1, Jan. 2023, pp. 61–74.
- [5] R. Putala and V. Ferencey, "Hydrogen Fuel Cell System Modeling Approaches," 2025 Cybernetics & Informatics (K&I), Mikulov na Morave, Czech Republic, 2025, pp. 1-7.
- [6] S. N. M., O. Tremblay and L. -A. Dessaint, "A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles," 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, USA, 2009, pp. 1722-1729.
- [7] I. M. M. Saleh, R. Ali and H. Zhang, "Simplified mathematical model of proton exchange membrane fuel cell based on horizon fuel cell stack," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 668-679, October 2016.
- [8] Horizon Educational, "H-500 PEM Fuel Cell – 500 W." Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <http://www.horizoneducational.com/h-500-pem-fuel-cell-500W/p1353>
- [9] X. Yang, P. Wang, Q. Li, W. Nie and M. Sun, "Modeling and Simulation Analysis of Fuel Cell Stack Model," 2024 5th International Conference on Clean Energy and Electric Power Engineering (ICCEPE), Yangzhou, China, 2024, pp. 125-128.



- [10] N. Nim-on, “วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแยกโดด,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2012.
- [11] W. Surakan, M. Niyomthai, A. Suyapan, T. Narongrit and K. Areerak, "The Cascade PI Controller Design for Hydrogen Electric Bike Systems," 2025 13th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Hua Hin, Thailand, 2025, pp. 1-4.
- [12] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, July 2006.