

## การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ระบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อการใช้งานเฉพาะที่ Modeling and Analysis of Fuel Cell Systems for Stationary Applications

บรรณัญติ บริบูรณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี 64 ถ.ทหาร ต.หมากแข้ง อ.เมือง จ.อุดรธานี 41000

ติดต่อ: bbribun@windowslive.com, 042-211040 – 59 ต่อ 3653

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ระบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อการใช้งานเฉพาะที่ การจำลองเซลล์เชื้อเพลิงเยื่อหุ้มแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) และเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง (SOFC) ใช้แบบจำลองที่พัฒนาจากงานวิจัยนี้ และพัฒนารหัสคำสั่งที่เขียนในซอฟต์แวร์ GNU Octave การจำลองพิจารณา PEMFC และ SOFC ครอบคลุมทั้งกรณีการดำเนินงานในสถานะอยู่ตัวและพลวัต ผลการจำลองซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะสำคัญที่นำเสนอเพื่อเปรียบเทียบในบทความนี้ คือการตอบสนองที่มีต่ออัตราการไหลของอากาศและไฮโดรเจน และการคงค่าความดัน

**คำหลัก:** การสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง, การจำลองเซลล์เชื้อเพลิง, ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

### Abstract

This paper presents the modeling and analysis of the fuel cell systems for stationary applications. For simulation, PEMFC and SOFC models have been developed by this research and coding in the GNU Octave. In the paper, the steady state and dynamical operation of PEMFC and SOFC technologies have been analysed, and their main characteristics have been compared, e.g. the response to the air and hydrogen flow rate and pressure regulation.

**Keywords:** fuel cell modeling, fuel cell simulation, fuel cell system.

### 1. บทนำ

เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจำแนกออกได้ 5 ชนิด คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่ม เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (เอเอฟเอ็ม) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอรัส (พีเอเอฟซี) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเดอหลอมเหลว (เอ็มเอฟเอฟซี) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (เอสโอเอฟซี) [1] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอสโอเอฟซี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่มเอฟซี และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอ็มซีเอฟซี มีมลพิษทางแก๊สต่ำหรืออาจไม่มีเลย และมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นสะดวกสำหรับ

การเคลื่อนย้ายและการติดตั้ง การประยุกต์ใช้งานใช้งานจริงในกรณีของการไฟฟ้า ต้องติดตั้งตัวคงค่าแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง ตัวควบคุมกำลังจริง และตัวควบคุมกำลังรีแอกทีฟ [2] การลดการใช้แก๊สออกซิเจน และยืดอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำได้ด้วยการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องแปลงผันแบบดิจิทัลและตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบดิจิทัล [3] สำหรับปัญหาการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน สามารถแก้ไขได้ด้วยการออกแบบวงจรแปลงผัน ตัวกรองต่ำผ่าน และตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด [4] งานวิจัยที่นำเสนอแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงเอสโอเอฟซี เพื่อจำลองเสถียรภาพใน

ภาวะชั่วคราว แบบจำลองครอบคลุมรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อด้วยเซลล์เชื้อเพลิง และเครื่องกำเนิดกระจายศูนย์แบบกังหันแก๊ส เสถียรภาพของกำลังเอาต์พุต การควบคุมเสถียรภาพใช้วิธีปรับค่ามุมจุดชนวนของเครื่องผกผัน ซึ่งมีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์เชื้อเพลิงให้เป็นกระแสสลับ นำเสนอโดย [5]

ในปี ค.ศ. 2004 มีการนำเสนอการพัฒนาตัวจำลองผลสำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าเชื้อเพลิงขนาด 3 kW [6] ส่วนประกอบระบบที่พิจารณาทั้งหมดประกอบไปด้วยตัวประมวลผลเชื้อเพลิง ระบบจัดการอากาศ น้ำ พลังงาน ความร้อน และกำลัง การควบคุมกระแสและแรงดันเซลล์เชื้อเพลิงใช้ระเบียบวิธีแบบเชิงเส้น เนื่องจากมีความง่ายและใช้เวลาสำหรับการจำลองผลที่รวดเร็ว วงจรเครื่องแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงเลือกใช้แบบบริดจ์เต็ม โดยเพิ่มค่าแรงดันกระแสตรงของเซลล์เชื้อเพลิงจาก 39 – 60 V ให้มีค่าเอาต์พุตเท่ากับ 380 V ในขณะที่วงจรเครื่องผกผันกระแสตรงเป็นกระแสสลับเลือกใช้แบบเฟสเดียว เปลี่ยนแรงดันกระแสตรงจากเครื่องแปลงผันให้เป็นกระแสสลับขนาด 220 V บทความดังกล่าวนี้สรุปว่าผลการจำลองและผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกัน ในปีเดียวกันนี้ มีการนำเสนอวิธีการควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มสำหรับภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได และกำหนดให้โหลดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านพักอาศัยเพียงแห่งเดียวเท่านั้น [7] ผลการจำลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำนายผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง ที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ ในขณะที่การวิเคราะห์พลวัต และภาวะชั่วคราวของระบบจำหน่ายที่มีการเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง [5] ซึ่งการผสมผสานระหว่างการทำงานของโรงผลิตกำลังเซลล์เชื้อเพลิง และโรงผลิตกำลังกังหันแก๊ส สามารถปรับปรุงปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้าได้

ในปี ค.ศ. 2005 มีการนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองและการจำลองระบบไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนพารามิเตอร์ให้เป็นส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า และการเชื่อมระหว่างส่วนประกอบทั้งหมดเสมือนการเชื่อมต่อของส่วนประกอบวงจร [2] ในปีเดียวกันนี้ มีการนำเสนอเครื่องแปลงผันและเครื่องผกผันประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพต่ำ [8] ผลการทดสอบระบุว่าประสิทธิภาพกำลังสูงสุดของเครื่องผกผันมีค่ามากกว่า 95% และความเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดน้อยกว่า 1.1% ในปี ค.ศ. 2008 มีการนำเสนอการพัฒนาตัวจำลองพลวัตเครื่องแปลงผัน DC/DC พีดับเบิลยูเอ็มสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [9] แบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้ประกอบไปด้วยสแต็กเซลล์เชื้อเพลิง ระบบจ่ายลม ระบบควบคุมพลังงานความร้อนระบบทำให้เย็น และระบบเครื่องแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรง

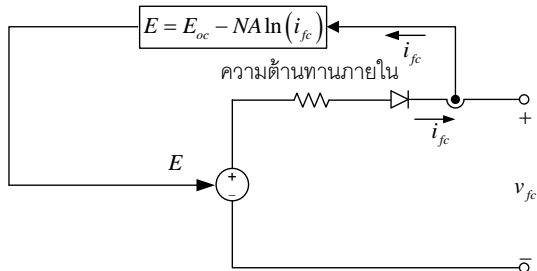
จากการอ้างอิงแบบจำลองส่วนประกอบระบบไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด ที่นำเสนอโดยบทความนี้และบทความที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาตัวจำลองผลที่มีความถูกต้องเท่ากับหรือมากกว่าและจดสิทธิบัตรตัวจำลองผล เพื่อพัฒนาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงตัวต้นแบบ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการเรียนการสอน หรือการพัฒนาเป็นโรงผลิตกำลังที่สามารถติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายในอนาคตได้

## 2. สแต็กของเซลล์เชื้อเพลิง

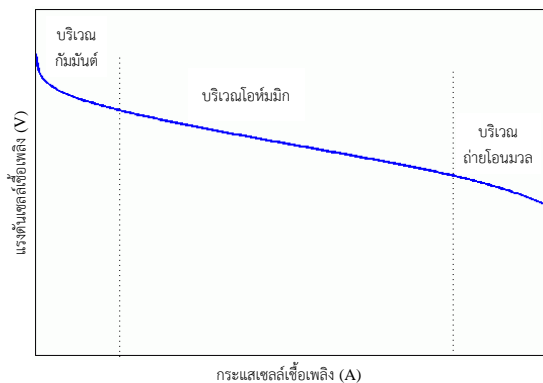
### 2.1 รายละเอียดของแบบจำลอง

วัตถุประสงค์ที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตของแบบจำลองสแต็กเซลล์เชื้อเพลิงคือไฮโดรเจนและอากาศ แผนภาพบล็อกของแบบจำลองอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 1 สมมติฐานของแบบจำลองนี้คือ เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่เงื่อนไขอุณหภูมิและความดันปกติ พารามิเตอร์ของวงจรสามารถ

วิเคราะห์หาได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน ซึ่งผู้ผลิตระบุในแผ่นข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิง ตัวอย่างของเส้นโค้งโพลาริเซชันแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกแบบจำลองอย่างง่ายของสแต็กเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 2 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิง

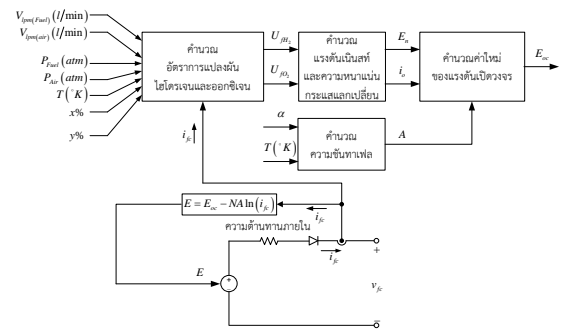
ช่วงแรกของเส้นโค้งโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเรียกว่าบริเวณกัมมันต์ แรงดันตกของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นผลอันเนื่องมาจากความช้าของปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวอิเล็กโทรด ความกว้างของบริเวณกัมมันต์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน ชนิดของอิเล็กโทรด และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา บริเวณที่สองเป็นความสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานภายในของสแต็กเซลล์เชื้อเพลิง และบริเวณที่สาม ความสูญเสียถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในสมการแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงประกอบไปด้วยความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล

ของเชื้อเพลิงและอากาศ สมการแรงดันเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงคือ

$$E_{oc} = N(E_n - A \ln(i_o)) \quad (1)$$

$$A = \frac{RT}{\alpha zF}$$

เมื่อ  $R = 8.3145 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ ,  $F = 96,485 \text{ A}\cdot\text{s/mol}$ ,  $z$  คือจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่  $E_n$  คือแรงดันเนิร์นสต์ ขึ้นกับค่าแรงดันอุณหภูมิวัตต์ของเซลล์ อุณหภูมิ ความดัน และผลผลิตที่อยู่ในสแต็ก  $i_o$  คือกระแสแลกเปลี่ยน ขึ้นกับการไหลไปหน้าและย้อนกลับของอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรด อุณหภูมิ และความดันของปฏิกิริยา  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ ขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรด และตัวเร่งปฏิกิริยา และ  $T$  คืออุณหภูมิดำเนินการ วงจรสมมูลที่สอดคล้องกับแบบจำลองอย่างง่าย แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสมมูลแบบจำลองอย่างง่ายของสแต็กเซลล์เชื้อเพลิง

อัตราการแปลงผันไฮโดรเจน ( $U_{H_2}$ ) และออกซิเจน ( $U_{O_2}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$U_{H_2} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{Fuel}V_{lpm}(fuel)x\%}, \quad 0 \leq U_{H_2} < 1$$

$$U_{O_2} = \frac{60000RTNi_{fc}}{2zFP_{air}V_{lpm}(air)y\%}, \quad 0 \leq U_{O_2} < 1 \quad (2)$$

เมื่อ  $P_{Fuel}$  คือความดันสัมบูรณ์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่จ่าย (atm),  $P_{air}$  คือความดันสัมบูรณ์ของอากาศที่จ่าย (atm),  $V_{lpm(fuel)}$  คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (l/min),  $V_{lpm(air)}$  คืออัตราการไหลของอากาศ (l/min),  $x$  คือเปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (%) และ  $y$  คือเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนในตัวอย่างออกไซด์ (%)

แรงดันเนินสท์ ( $E_n$ ) และความหนาแน่นกระแสแล็กเปลี่ยน ( $i_o$ ) คำนวณหาได้จากสมการที่ (4)

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) & T \leq 100^\circ C \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) & T > 100^\circ C \end{cases} \quad (3)$$

$$i_o = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{RH} e^{-\frac{\Delta G}{RT}}$$

เมื่อ  $P_{H_2}$  คือความดันย่อยของไฮโดรเจนในสแต็ก  $P_{O_2}$  คือความดันย่อยของออกซิเจนในสแต็ก  $P_{H_2O}$  คือความดันย่อยของไอน้ำในสแต็ก  $k$  คือค่าคงตัวโบลต์ซ-มันน์ ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/°K),  $h$  คือค่าคงตัวพลังค์ ( $6.626 \times 10^{-34}$  J·s) และ  $\Delta G$  คือขนาดของกัมมันต์ซึ่งขึ้นกับชนิดของอิเล็กโทรดและตัวเร่ง สมการคำนวณความดันย่อยในสถานะอยู่ตัว  $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  และ  $P_{H_2O}$  ตามลำดับคือ

$$\begin{aligned} P_{H_2} &= P_{Fuel} x\% (1 - Uf_{H_2}) \\ P_{O_2} &= P_{Air} y\% (1 - Uf_{O_2}) \\ P_{H_2O} &= P_{Air} (w\% + 2y\% Uf_{O_2}) \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ  $w$  คือเปอร์เซ็นต์ของไอน้ำในตัวอย่างออกไซด์ (%) การคำนวณพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\Delta G$  ของวัสดุอ้างอิงจากเส้นโค้งโพลาริเซชันที่สภาวะการทำงานปกติ โดยมีการกำหนดค่าประสิทธิภาพของสแต็กในภาวะที่มีความร้อนต่ำ ส่วนประกอบของอากาศและเชื้อเพลิง ความดันและอุณหภูมิที่จ่าย ซึ่งสามารถหาได้จาก

แผ่นข้อมูลจากผู้ผลิต อัตราการแปลงผันแก๊สในภาวะที่กำหนดสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (9)

$$U_{f_{H_2}} = \frac{\eta_{nom} \Delta h^0 H_2O(gas) N}{zFV_{nom}} \quad (5)$$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{60000RT_{nom} NI_{nom}}{0.42zFP_{air, nom} V_{lpm(air), nom}}$$

เมื่อ  $\eta_{nom}$  คือ ค่าประสิทธิภาพความร้อนต่ำที่กำหนดของสแต็ก (%),  $\Delta h^0 H_2O(gas)$  คือ ค่าคงที่  $241.83 \times 103$  J/mol,  $V_{nom}$  คือค่าแรงดันที่กำหนด (V),  $I_{nom}$  คือค่ากระแสที่กำหนด (V),  $V_{lpm(air), nom}$  คือค่าอัตราการไหลอากาศที่กำหนด (l/min),  $P_{air, nom}$  คือความดันสัมบูรณ์ของอากาศที่ค่าที่กำหนด (Pa) และ  $T_{nom}$  คืออุณหภูมิทำงานที่กำหนด (°K)

## 2.2. การอ่านพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจากแผ่นข้อมูล

พารามิเตอร์สแต็กเซลล์เชื้อเพลิง NedStack PS6 ที่ระบุโดยผู้ผลิต แสดงในตารางที่ 1 กำลังพิกัดของสแต็กคือ 6 kW แรงดันกำหนดเท่ากับ 45 V พารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่อ่านจากแผ่นข้อมูลมีดังต่อไปนี้

- (1) แรงดันเปิดวงจร  $E_{OC} = 65$  V
- (2) จุดทำงานกำหนด  $[I_{nom}, V_{nom}] = [133.3$  A, 45 V]
- (3) จุดทำงานสูงสุด  $[I_{end}, V_{end}] = [225$  A, 37 V]
- (4) ประสิทธิภาพกำหนดของสแต็ก  $\eta = 55\%$
- (5) อุณหภูมิทำงาน  $65^\circ C$
- (6) ค่ากำหนดของความดันที่จ่าย  $[H_2, \text{อากาศ}] = [1.5, 1]$
- (7) องค์ประกอบกำหนด (%)  $[H_2, O_2, H_2O (\text{อากาศ})] = [99.999, 21, 1]$
- (8) จำนวนเซลล์ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่

$$N = \frac{2 \times 96485 V_{nom}}{241.83 \times 10^3 \eta_{nom}} = \frac{2 \times 96485 \times 45}{241.83 \times 10^3 \times 0.55} = 65.28 \approx 65 \text{ cells} \quad (6)$$

(9) อัตราการไหลของอากาศที่ค่ากำหนด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$V_{Imp(air)_{nom}} = \frac{I_{nom} V_{Imp(air)_{max}}}{I_{end}} = \frac{(133.3)(500)}{225} = 297 \text{ liters/min} \quad (7)$$

### 2.3 ข้อสมมติพื้นฐานของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการจำลองถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

- (1) แก๊สเป็นแก๊สอุดมคติ
- (2) สแตกถูกป้อนด้วยไฮโดรเจนและอากาศ
- (3) อุณหภูมิของแคโทดและแอโนดมีเสถียรภาพและเท่ากับอุณหภูมิของสแตก
- (4) ความชื้นของเซลล์ที่ภาวะโหลดต่างกันมีค่าเหมาะสมทั้งหมด
- (5) ในกรณีที่กระแสเอาต์พุตต่ำกว่า 1 A แรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันเปิดวงจร

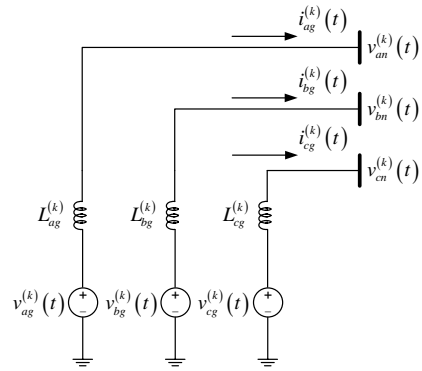
### 3. แบบจำลองระบบไฟฟ้าสามเฟสเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง

โปรแกรมที่ใช้จำลองสำหรับงานวิจัย เป็นรหัสคำสั่งที่พัฒนาขึ้นภายใต้ทรัพยากรของซอฟต์แวร์ GNU Octave โดยใช้สมการแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2 และองค์ประกอบอื่นของระบบซึ่งประกอบไปด้วย บัสอนันต์ สายป้อนสามเฟส และโหลด ซึ่งมีรายละเอียดสมการแบบจำลองดังต่อไปนี้

#### 3.1 แบบจำลองบัสอนันต์

ทอพอโลยีวงจรแบบจำลองบัสอนันต์แสดงในรูปที่ 4 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันบัส  $k$  และกระแสที่จ่ายแสดงในสมการที่ (13)

$$\mathbf{i}_{abc,g}^{(k)}(t) = \mathbf{i}_{abc,g}^{(k)}(t - \Delta t) + \mathbf{G}_{eff,g}^{(k)} [\mathbf{v}_{abc,g}^{(k)}(t) + \mathbf{v}_{abc,g}^{(k)}(t - \Delta t)] - \mathbf{G}_{eff,g}^{(k)} [\mathbf{v}_{abc,n}^{(k)}(t) + \mathbf{v}_{abc,n}^{(k)}(t - \Delta t)] \quad (8)$$



รูปที่ 4 ทอพอโลยีของวงจรแบบจำลองบัสอนันต์

เมื่อ  $\mathbf{v}_{abc,g}^{(k)}(t)$  คือเวกเตอร์แรงดันกำเนิดสามเฟส  $\mathbf{v}_{abc,n}^{(k)}(t)$  คือเวกเตอร์แรงดันบัสสามเฟส  $\mathbf{i}_{abc,g}^{(k)}(t)$  คือเวกเตอร์กระแสเครื่องกำเนิดสามเฟสที่จ่ายให้บัส  $k$  และ  $\mathbf{G}_{eff,g}^{(k)}$  คือเมทริกซ์ความนำสมมูลภายในสามเฟสของเครื่องกำเนิด

#### 3.2 แบบจำลองกระแสของสายส่งสามเฟสที่เชื่อมระหว่างบัส

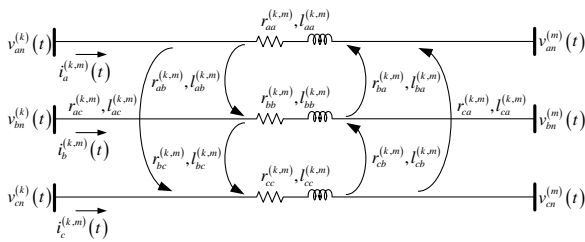
ทอพอโลยีของวงจรแบบจำลองสายป้อนในแต่ละเฟสประกอบไปด้วยตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากแบบจำลองพิจารณาผลของฟลักซ์แม่เหล็กเชื่อมโยงระหว่างสายป้อนทั้งสามเฟส จึงต้องพิจารณาผลของความต้านทานร่วม และความเหนี่ยวนำร่วมของสายป้อน ทอพอโลยีของวงจรแบบจำลองสายป้อนแสดงในรูปที่ 5 สมการแบบจำลองกระแสสายป้อนที่ไหลระหว่างบัส  $k$  และบัส  $m$  แสดงในสมการที่ (14)

$$\mathbf{i}_{abc}^{(k,m)}(t) = (\mathbf{R}_{eq,t}^{(k,m)})^{-1} \mathbf{v}_{abc,n}^{(k)}(t) - (\mathbf{R}_{eq,t}^{(k,m)})^{-1} \mathbf{v}_{abc,n}^{(m)}(t) + (\mathbf{R}_{eq,t}^{(k,m)})^{-1} \mathbf{R}_{eff,t}^{(k,m)} \mathbf{i}_{abc}^{(k,m)}(t - \Delta t) + (\mathbf{R}_{eq,t}^{(k,m)})^{-1} \mathbf{v}_{abc}^{(k,m)}(t - \Delta t) \quad (9)$$

เมื่อ  $\mathbf{R}_{eq,t}^{(k,m)}$  คือเมทริกซ์ความต้านทานร่วมสมมูลของสายป้อนระหว่างบัส  $k$  และบัส  $m$ ,  $\mathbf{v}_{abc,n}^{(k)}(t)$  คือ

เวกเตอร์แรงดันสามเฟสของบัส  $k$ ,  $\mathbf{v}_{abc,n}^{(k,m)}(t)$  คือเวกเตอร์แรงดันสามเฟสของบัส  $m$  และ  $\mathbf{v}_{Labc}^{(k,m)}(t)$  คือแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์คู่ควบ ซึ่งมีสมการแบบจำลองดังสมการที่ (15)

$$\mathbf{v}_L^{(k,m)}(t) = \mathbf{R}_{off,I}^{(k,m)} [\mathbf{i}_{abc}^{(k,m)}(t) - \mathbf{i}_{abc}^{(k,m)}(t - \Delta t)] - \mathbf{v}_L^{(k,m)}(t - \Delta t) \quad (10)$$

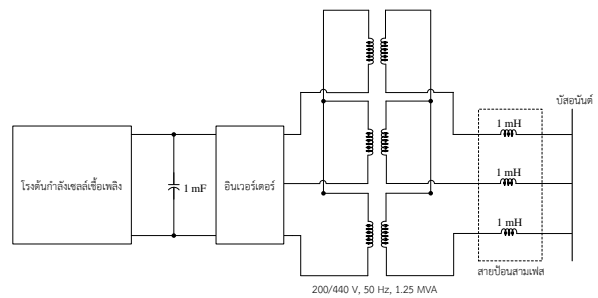


รูปที่ 5 ทอพอโลยีของวงจรแบบจำลองสายป้อน

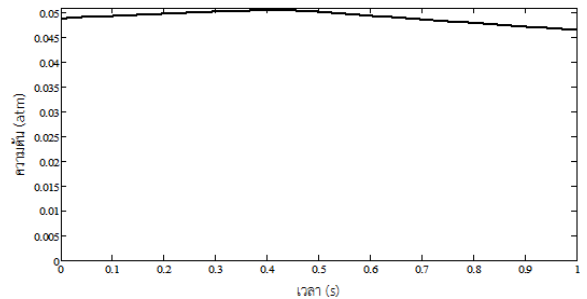
#### 4. ผลการจำลอง

ทอพอโลยีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสามเฟสแสดงในรูปที่ 6 จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขององค์ประกอบระบบไฟฟ้าสามเฟสที่กล่าวถึงข้างต้น เมื่อนำมาพัฒนาชุดคำสั่งโปรแกรมการจำลอง ร่วมกับแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ตัวเก็บประจุ และอินเวอร์เตอร์ ผลการการจำลองแสดงในรูปที่ 7-9 เมื่อพิจารณาเส้นโค้งความดันของไฮโดรเจน เส้นโค้งความดันของไอน้ำ และเส้นโค้งความดันของออกซิเจนในรูปที่ 7-9 ตามลำดับจะพบว่า ตัวควบคุมสามารถลดค่าความดันให้มีค่าคงที่ได้ทั้ง 3 กรณี เส้นโค้งแรงดันกระแสตรงเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปที่ 3.20 มีค่าคงที่ประมาณ 400 แอมแปร์ แรงดันกระแสตรงเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าคงที่ 50 V ในช่วงเวลา 0 – 0.4 วินาที และเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่เท่ากับ 160 โวลต์จนถึงเวลา 1 วินาที เมื่อนำเส้นโค้งของกระแสและแรงดันไปคำนวณกำลังเชิงซ้อนด้วยขั้นตอนวิธีของอนุกรมฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง จะได้ผลลัพธ์เป็นเส้นโค้งของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

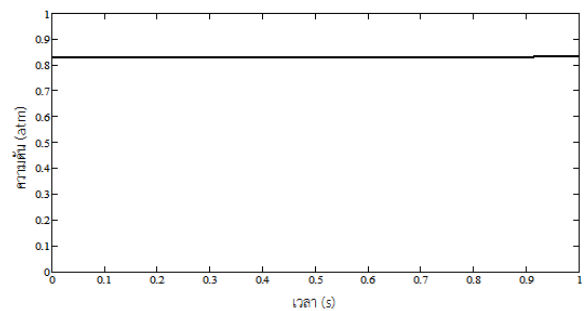
ต่ำสุดของกำลังรีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 0 p.u. ในช่วงเวลา 0 – 0.4 วินาที และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.1 p.u. ในช่วงเวลา 0.5 – 1 วินาที หากเปรียบเทียบกับกำลังจริงจะเห็นว่า มีค่าต่ำมาก เนื่องจากกระแสและแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่ไหลเป็นตัวเหนี่ยวนำกำลังเชิงซ้อนเอาต์พุตที่จ่ายให้ไหลจึงมีกำลังรีแอกทีฟในระดับที่ต่ำมาก



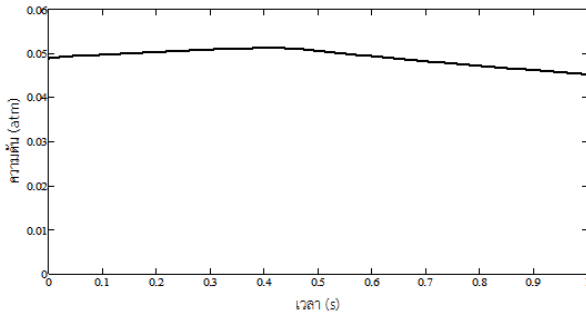
รูปที่ 6 ทอพอโลยีของวงจรเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสามเฟส



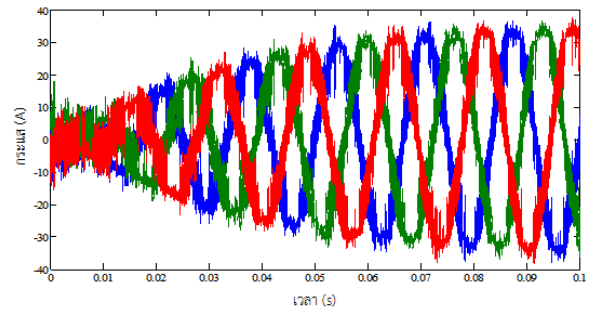
รูปที่ 7 เส้นโค้งความดันของไฮโดรเจน



รูปที่ 8 เส้นโค้งความดันของไอน้ำ

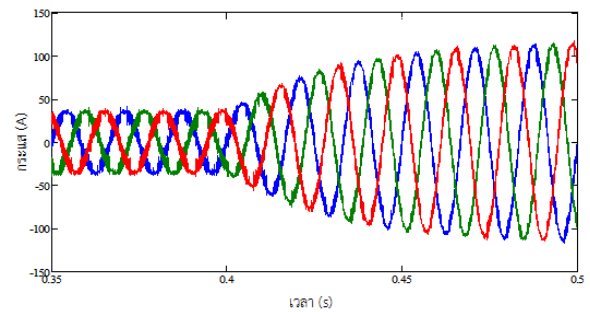


รูปที่ 9 เส้นโค้งความดันของออกซิเจน

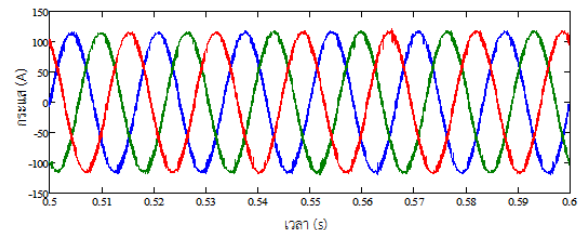


รูปที่ 11 เส้นโค้งกระแสสามเฟสที่บัสอนันต์สำหรับ  
ช่วงเวลา 0 – 0.1 วินาที

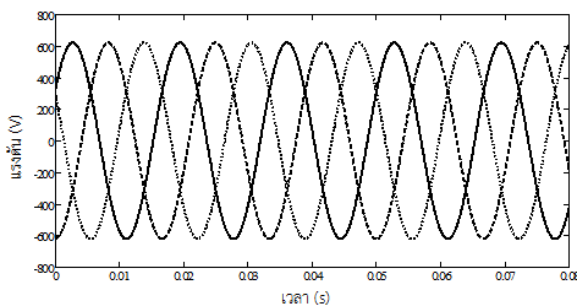
เนื่องจากบัสที่โรงต้นกำลังเซลล์เชื้อเพลิงเป็นบัสอนันต์ ค่าแรงดันรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยจึงมีค่าคงที่ ในขณะที่ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิมีค่าคงที่ 1.7 p.u. ในช่วงเวลา 0 – 0.4 วินาที และลดลงจนมีค่าคงที่เท่ากับ 1.6 p.u. เมื่อพิจารณาเส้นโค้งแรงดันสามเฟสที่เซลล์เชื้อเพลิงผกผันจากอินเวอร์เตอร์และส่งผ่านหม้อแปลงจะเห็นว่า รูปสัญญาณมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์ชวยอด แต่รูปสัญญาณแรงดันที่บัสอนันต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงและยังคงมีรูปร่างเป็นไซน์ชวยอดดังแสดงในรูปที่ 10 เนื่องจากองค์ประกอบของระบบที่จำลองมีทั้งตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ผลตอบสนองของกระแสสามเฟสที่บัสอนันต์จึงประกอบไปด้วยผลตอบสนองชั่วครู่ ดังรูปสัญญาณช่วงเวลา 0 – 0.1 วินาทีที่แสดงในรูปที่ 11 และผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ดังรูปสัญญาณช่วงเวลา 0.5 – 0.6 วินาทีที่แสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 12 เส้นโค้งกระแสสามเฟสที่บัสอนันต์สำหรับ  
ช่วงเวลา 0.35 – 0.5 วินาที



รูปที่ 13 เส้นโค้งกระแสสามเฟสที่บัสอนันต์สำหรับ  
ช่วงเวลา 0.5 – 0.6 วินาที



รูปที่ 10 เส้นโค้งแรงดันสามเฟสที่บัสอนันต์

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลองการทำงานของสแต็กเซลล์เชื้อเพลิง และการเชื่อมต่อโรงต้นกำลังเซลล์เชื้อเพลิงกับบัสอนันต์ การควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และออกซิเจน ส่งผลกระทบโดยตรงต่อแรงดันเอาต์พุตประสิทธิภาพของสแต็ก ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมจึงเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับโรงต้นกำลังเซลล์เชื้อเพลิง ในขณะที่การเชื่อมต่อเซลล์เชื้อเพลิง

เข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส บทสรุปที่ได้จากผลการจำลองคือประสิทธิภาพและการทำงานของตัวหมักผันส่งผลกระทบโดยตรงต่อรูปสัญญาณเอาต์พุตของโรตัมกำลัง และรูปสัญญาณของกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านหม้อแปลงแล้วส่งผ่านไปยังกริดและสายป้อนของการไฟฟ้า แม้ว่าบัสอนันต์จะมีคุณสมบัติพิเศษคือ ขนาดของแรงดัน และรูปสัญญาณของกำลังไฟฟ้ามีค่าคงที่ แต่เมื่อมีการเชื่อมต่อกับโรตัมกำลังเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ทั้งหมด ผลตอบสนองของกระแสที่บัสอนันต์จึงประกอบไปด้วยผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่ และสถานะอยู่ตัว ซึ่งภายในระยะเวลาที่ไม่ยาวนาน ผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่ดังกล่าวนี้จะหายไปจากระบบ ความรุนแรงของสถานะชั่วครู่ดังกล่าวนี้ อาจส่งผลกระทบในทางเสียหายต่อระบบไฟฟ้า เช่น เกิดความผิดพลาดเป็นต้น ซึ่งเป็นภาวะที่จะต้องมีการพิจารณาเมื่อมีการออกแบบระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า หรือเมื่อมีการจัดลำดับความสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกันภายในระบบ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Rahman, S. (2001). Fuel cell as a distributed generation technology. Paper presented at the Power Engineering Society Summer Meeting, 2001.

[2] Wang, C., Nehrir, M. H., and Shaw, S. R. (2005). Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 20(2), pp. 442-451.

[3] Song, Y., Han, S. B., Li, X., Park, S. I., Jeong, H. G., and Jung, B. M. (2007). A power control

scheme to improve the performance of a fuel cell hybrid power. Paper presented at the Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE.

[4] Wang, C. and Nehrir, M. H. (2007). Fuel cells and load transients. Power and Energy Magazine, IEEE, 5(1), pp. 58-63.

[5] Sedghisigarchi, K. and Feliachi, A. (2004). Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel Cells-part I: fuel-cell dynamic model. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 19(2), pp. 423-428.

[6] Lee, T. W., Kim, S. H., Yoon, Y. H., Jang, S. J., and Won, C. Y. (2004). A 3 kW fuel cell generation system using the fuel cell simulator. Paper presented at the Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on.

[7] El-Sharkh, M. Y., Rahman, A., Alam, M. S., Sakla, A. A., Byrne, P. C., and Thomas, T. (2004). Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant. Power Systems, IEEE Transactions on, 19(4), pp. 2022-2028.

[8] Wai, R.-J. and Duan, R.-Y. (2005). High-efficiency power conversion for low power fuel cell generation system. Power Electronics, IEEE Transactions on, 20(4), pp. 847-856.

[9] Choe, S. Y., Ahn, J. W., Lee, J. G., and Baek, S. H. (2008). Dynamic simulator for a PEM fuel cell system with a PWM DC/DC converter. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 23(2), pp. 669-680.