

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

Modeling of PEM Fuel Cell with DC/DC Buck Converter by MATLAB/Simulink

ประสิทธิ์ พรหมมินทร์¹, วันชัย ทรัพย์สิงห์^{2*}

Prasith Prommin¹, Wanchai Subsingha^{2*}

Received : 15 October 2012 ; Accepted : 10 December 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อการศึกษาเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ขึ้นมาทดแทนซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าด้านเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นรุ่น NEXA@1200 ของบริษัท Ballard ขนาดพิกัดกำลัง 1200 วัตต์ แรงดันขาออกที่ 26 – 43 โวลต์ จากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการพบว่าผลการจำลองมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองและในการทดลอง นอกจากนี้ผลการจำลองของวงจรเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดัน แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการอย่างเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

Abstract

This paper presents a mathematical model using MATLAB / Simulink to analyze the performance of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) together with a DC/DC buck converter model. It will lead to a building of a prototype PEMFC simulator, which will be useful to study the behavior of the fuel cell. The fuel cell in the project is a 1.2 kW, 26-43 output voltage NEXA@1200 from Ballard Company. The simulation result was compared with an actual experiment in a laboratory by using the same parameters, such as pressure of hydrogen and oxygen flow rate. In addition, the simulation results show that output voltage from the DC/DC buck converter model is approximately close to the actual PEMFC in an experimental lab.

Keywords: Fuel cell, Mathematical Model, Fuel cell Model

¹ นิสิตปริญญาโท, ² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Master degree student, ² Assist. Prof., Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

* Corresponding author; Wanchai Subsingha, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand. sit777@hotmail.com

บทนำ

พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดเป็นพลังงานทางเลือกทางหนึ่งในอนาคต ถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยไม่ต้องมีกระบวนการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC มีข้อดีคือน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ปัจจุบันราคาเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูงมากและอายุการใช้งานที่จำกัด ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมแนวคิดในการสร้างเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC จึงเกิดขึ้น โดยอ้างอิงจากตัวเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท Ballard รุ่น NEXA 1200 ขนาด 1.2kW ให้แรงดันไฟฟ้าขาออก 26-43 โวลต์ในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัย เครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC มีสองส่วนคือส่วนที่เป็นระบบของแบบจำลอง PEMFC และส่วนที่เป็นแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำงานร่วมกันโดยสร้างแบบจำลองทั้งสองส่วนด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าค่าที่ค่าที่ได้สอดคล้องกับผลการวัดแรงดันขาออกเมื่อทำการเพิ่มกระแสโหลด จากปัจจัยของอุณหภูมิ และความดันไฮโดรเจน เพื่อศึกษา

พฤติกรรมของแบบจำลองทั้งสอง โดยเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำให้แรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลง ก่อนนำไปสร้างเป็นชิ้นงานจริงต่อไป

ทฤษฎี

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นพลังงานสะอาดไม่เกิดควันพิษจากการเผาไหม้ จึงปราศจากมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แหล่งพลังงานที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักของเซลล์เชื้อเพลิงมาจาก ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) ทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซออกซิเจน (Oxygen) ในรูปของอากาศ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemically) ผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้คือ ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันต่ำ ความร้อน และน้ำ ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้กับโหลดทางไฟฟ้าได้หลากหลาย

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC เริ่มต้นจากการอัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) เข้าสู่ขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ความดันเพื่อให้ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไปได้ หลังจากก๊าซไฮโดรเจน ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้ว จะทำการปล่อยอะตอมขั้วบวก (H^+) ไปสู่ขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิง และปล่อยอิเล็กตรอน (e^-) ผ่านขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของ เซลล์เชื้อเพลิง สำหรับออกซิเจนจะถูกดันผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกัน แต่ผ่านทางทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงดูอะตอมของ H^+ ผ่านชั้นเมมเบรนเข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H_2O)

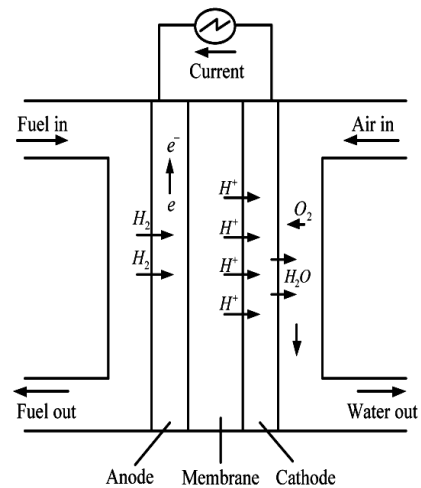
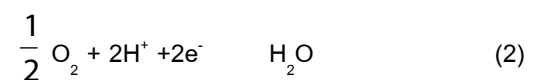


Figure 1 Principle of the fuel cell PEMFC

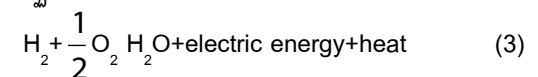
ปฏิกิริยาเคมีของขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาเคมีรวม



ในสภาพไม่มีโหลดเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์จะให้แรงดัน ประมาณ 0.8-1.2 V ที่พิกัดกระแสประมาณ 0.5 A/cm² ดังนั้น จึงต้อง ต่ออนุกรมหลายๆ เซลล์เข้าด้วยกันเป็นก้อนเซลล์

เชื้อเพลิงหรือที่เรียกว่า Fuel-cell stack เพื่อให้ได้แรงดันที่สูงขึ้น¹

ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง

แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V แต่อย่างไรก็ตาม จะพบว่าความจริงว่าแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิต เมื่อสื่อนำวโคจรและแรงดันไฟฟ้าก็จะต่ำลงเมื่อวัดจุดบัพที่ใดเพิ่มขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงในการดำเนินงานจริงนั้นจะเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่ากระบวนการโพลาไรเซชัน (Polarization) เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการตามความเป็นจริงมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี²

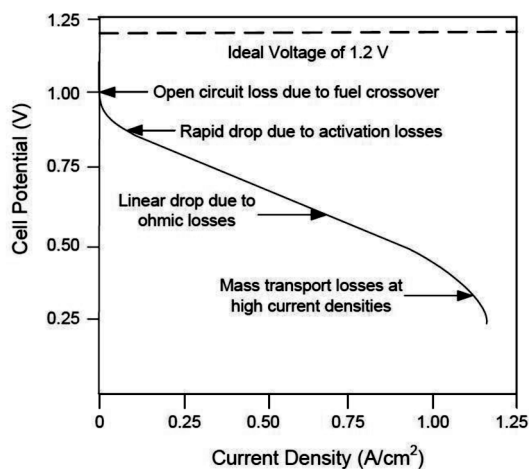


Figure 2 The polarization curve for a PEMFC

ค่าแรงดันไฟฟ้าเกินตัวที่ต้องนำมาหักลบ โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (V_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$V_{cell} = V_{open} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (4)$$

โดยที่ V_{open} คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน หรือ ศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี

V_{act} คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากการปฏิกิริยาเคมี, V_{ohmic} คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า, V_{conc} คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล โดย ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวทั้ง 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{open} = V_o - \left[\left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}} \right) \right] \quad (5)$$

โดยมีปัจจัยที่สำคัญดังในสมการที่ (5) สมการของ Nernst สามารถคำนวณค่าแรงดันขณะที่ไม่มีโหลดจากปฏิกิริยาทางเคมีได้เมื่อ R คือค่าคงที่ของก๊าซซึ่งค่าเท่ากับ 8.3144 J/mol, F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ 96,487 C/mol, V_o คือค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เชื้อเพลิง, T คืออุณหภูมิหน่วยองศาเคลวิน, n คือจำนวนของอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล, P_{H_2O} คือค่าความดันของน้ำ, P_{H_2} คือค่าความดันของไฮโดรเจน, P_{O_2} คือค่าความดันของออกซิเจน

สภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ดังรูปที่ 2 พบว่าเกิดการสูญเสียมีผลให้แรงดันลดลง ซึ่งมีทั้งหมดสามช่วงด้วยกันช่วงแรกจะเกิดการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมีเขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{I_{dc}}{I_o} \right) \quad (6)$$

ช่วงที่สองการสูญเสียแรงดัน มีค่าระหว่าง 0.6-0.7 VDC จะเป็นลักษณะเชิงเส้นเนื่องจากเกิดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและเมมเบรน R_{fc} ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานไอออนิกความต้านทานอิเล็กโทรนิกส์และความต้านทานหน้าสัมผัสของตัวนำหาได้จากสมการที่ (7)

$$V_{ohmic} = I_{dc} R_{fc} \quad (7)$$

ช่วงสุดท้ายคือการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส เพราะสารถูกใช้ในอัตราที่สูง แต่การถ่ายเทมวลสารเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นไปได้ช้าจากสมการที่ (8)

$$V_{conc} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(1 - \frac{I_{dc}}{I_{limit}} \right) \quad (8)$$

แบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

แบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทางคณิตศาสตร์ เป็นการพัฒนามาบนพื้นฐานของสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากสมการที่ (4) ถึง (8) โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงใน MATLAB เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) พิกัดกำลังไฟฟ้า ขนาด 1.2 kW 46A เป็นรุ่น NEXA@1200 ของบริษัท Ballard สามารถทำการปรับค่าความดันก๊าซไฮโดรเจน ออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลได้อย่างอิสระซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันขาออกเปลี่ยนแปลง ทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการซึ่งในสภาวะไร้โหลด ขณะมีโหลดเมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าความดันของก๊าซไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ในการผลิตไฟฟ้าให้เป็นไปตามค่าความดันไฮโดรเจน ออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลให้สอดคล้องกับสมการที่ (4) ถึง (8)^{1,2}

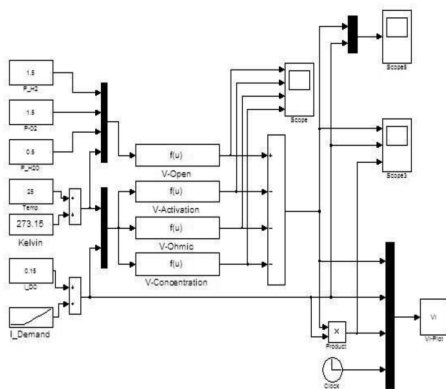


Figure 3 PEM fuel cells modeling



Figure 4 Experimental test bench

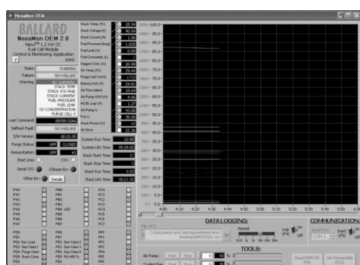


Figure 5 Programs BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application

จากผลการทดลองแสดงแรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้ในสภาวะแบบจำลองมีค่า 45.3 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 40.8 V และในสภาวะมีโหลดสูงสุดในแบบจำลองมีค่า 30 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 27.8 V เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้มีพิกัดกำลัง 1200 วัตต์ กระแสสูงสุดที่ 46 แอมป์

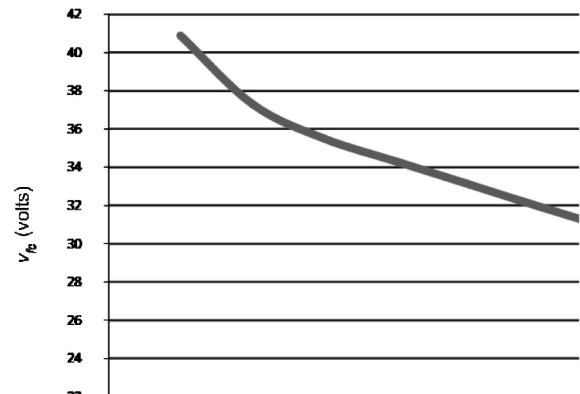


Figure 6 Measured Output Characteristics of the Nexa 1.2 kW

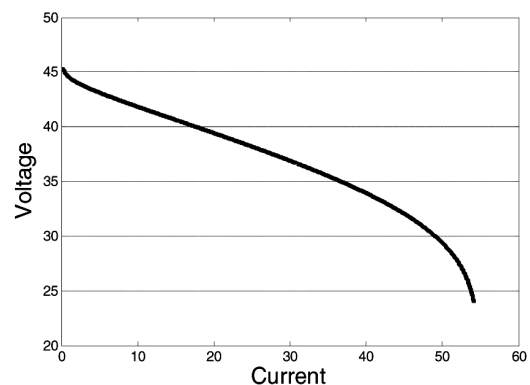


Figure 7 PEM fuel cell characteristic simulated in Simulink

ผลในทางปฏิบัติจะมีค่า ผิดพลาดอยู่บ้างจากแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อเป็นการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้มีค่าความผิดพลาดน้อยลง การสร้างแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำงานร่วมกับแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงให้มีการทำงานสอดคล้อง และใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองและการทดลองในห้องปฏิบัติโดยทำการปรับค่าความดันก๊าซไฮโดรเจน ออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลได้อย่างอิสระ

แรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าสอดคล้องเป็นไปแนวทางเดียวกันกับคุณสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 303 °K ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์

การสร้างแบบจำลอง และส่วนประกอบ

วงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink กำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ มีค่า 1200 วัตต์ แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าระหว่าง 26-43 โวลท์ กระแสไฟฟ้าด้านขาออกมีค่าระหว่าง 1-46 แอมป์ ความถี่สวิตช์ของสัญญาณฟันเลื่อยหรือ $f_s = 10$ kHz นำไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ผลที่ได้คือสัญญาณพัลส์ที่มีค่าดีไซด์ไซเคิลเปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันที่เข้ามาเปรียบเทียบกับไฟฟ้ากระแสตรง 60 VDC จะป้อนให้กับตัว IGBT ความต้านทานของโหลด 10 โอห์ม จะสามารถคำนวณหาอัตราขยายแรงดันได้ดังสมการที่ (9) การหาความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ยังทำงานในโหมดกระแสโหลดต่อเนื่องได้จากสมการที่ (10) และอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกหาได้จากสมการที่ (11)³

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (9)$$

$$L_{min} = [(1 - D_{max})R] / 2f_s \quad (10)$$

$$V_{ripple} = \frac{1 - D_{max}}{8LCf_s^2} \quad (11)$$

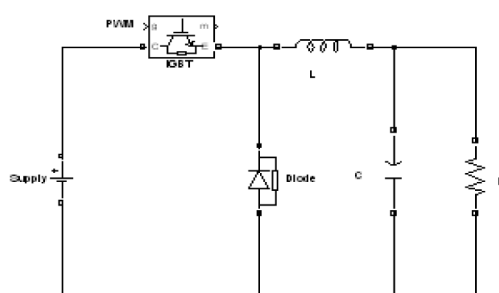


Figure 8 DC/DC buck converter diagram

การจำลอง และผลการจำลองระบบ

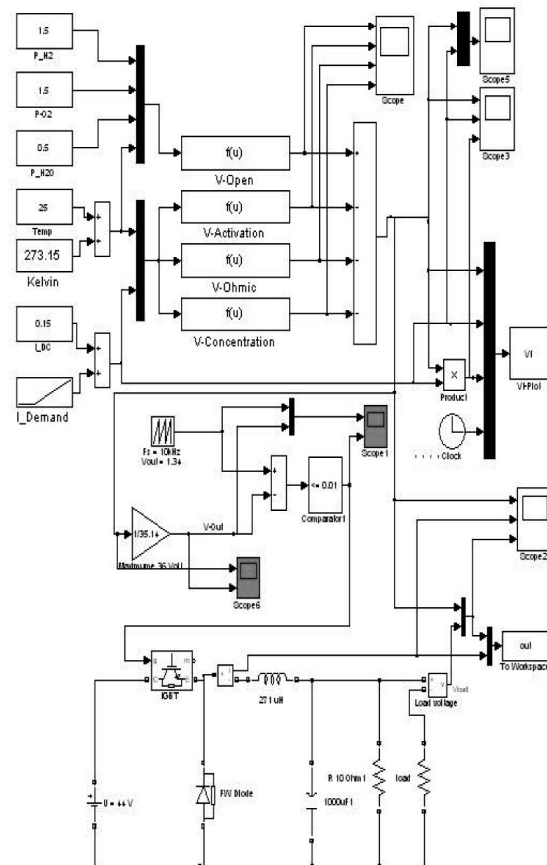


Figure 9 Modeling of PEMFC together with DC/DC buck converter by Matlab/ Simulink

ผลการจำลองของระบบ

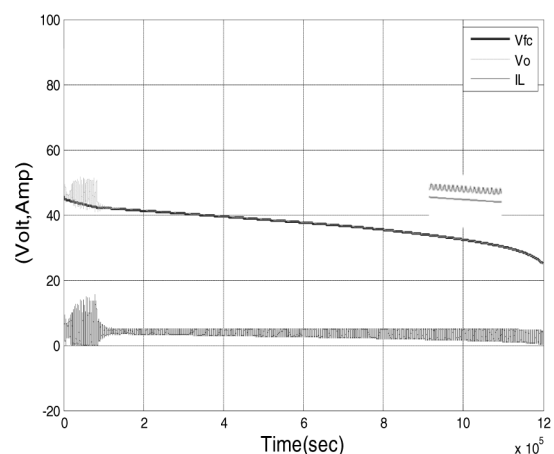


Figure 10 Experimental results from both Steady-state voltage of PEMFC mathematical model and DC Converter model

ผลการจำลองของระบบที่ทำงานร่วมกัน พบว่าวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถกำเนิดแรงดันไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกันตามแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงและเปรียบเทียบแรงดันขาออกทั้งสองมีผลใกล้เคียงกัน ผลการจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าทำการเปรียบเทียบขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ที่ 26 – 43 โวลต์ มีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกันโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองโดยทำการปรับค่าความต้านทานไฮโดรเจน ออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลได้เพื่อให้ค่าแรงดันที่เหมาะสมตามเงื่อนไขของพารามิเตอร์ต่างๆ ตามคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง

สรุป

ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีการทำงานสอดคล้องกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆพบว่าความต้านทานของไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อต่อร่วมกับแบบจำลองของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงขาออกที่สอดคล้องกับหลักทฤษฎี และคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าค่าแรงดันที่วัดได้จริงจะให้ค่าแรงดันที่ต่ำกว่าแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า และค่าอัตราการแลกเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกที่ได้มีค่า 1% ส่วนปัญหาที่พบในการจำลองของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ความถี่สวิตช์ที่สูงกว่า 10 kHz จำเป็นต้องใช้เวลาในการจำลองค่อนข้างนานเกินไป อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC สำหรับใช้ในการศึกษาค้นคว้าด้านเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการทดลองต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. A. Kirubakaran, Shailendra Jain. The PEM Fuel Cell System with DC/DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation. International Journal of Recent Trends in Engineering 2009;1:
2. Colleen Spiegel. PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab. USA: Elsevier; 2008.
3. วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ชาราวีร์เศรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์หจก.วี.เจ.พรินติ้ง; 2550.