

แหล่งจ่ายพลังงานในระบบขับเคลื่อนเซลล์ เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

The Empirical Models of the Energy Sources in a Hybrid Fuel Cell Propulsion System for Scooter

นาถรงค์ ลิ้มวุฒิไกรจิรัฐ¹ และอังคิร ศรีรักษากร²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ ของแหล่งจ่ายพลังงานสามชนิดที่ใช้ในงานพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ขนาด 1.2 กิโลวัตต์ แบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่วแบบผนึก และ ชุดเก็บประจุความจุสูง ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองแหล่งจ่ายพลังงานแต่ละชนิดกำหนดได้จากการทดสอบการจ่ายพลังงานในรูปแบบต่างๆ ผ่านทางชุดรับภาระทางไฟฟ้า เพื่อความเชื่อมั่นในการนำแบบจำลองแหล่งจ่ายพลังงานไปใช้งาน จึงได้ประเมินความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้การจ่ายพลังงานแบบเป็นวัฏจักร พบว่าแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงให้การทำนายปริมาณการใช้เชื้อเพลิงผิดพลาดไปจากค่าที่วัดได้จริง 3.4% และการทำนายแรงดันไฟฟ้าตลอดวัฏจักรที่ทดสอบมีความผิดพลาดสูงสุด 5.4% สำหรับแบบจำลองแบตเตอรี่มีความผิดพลาดในการทำนายระดับการประจุ 2.1% และการทำนายแรงดันไฟฟ้าตลอดวัฏจักรที่ทดสอบมีความผิดพลาดสูงสุด 5.7% และแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูงมีความผิดพลาดในการทำนายแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับพลังงาน 2.0% จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองของแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสาม ให้ความแม่นยำดีเพียงพอ และนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบขับเคลื่อนต่อไปได้

Abstract

This paper presents empirical models of energy sources in a development of a hybrid fuel cell propulsion system for a scooter including a 1.2 kW proton exchange membrane fuel cell, a sealed lead acid battery and a supercapacitor. Parameters of each energy source model were determined by testing which implemented by programmable electronic load. For the purpose of the reliability to apply these energy source models, a set of selected driving cycles load were used to assess the accuracy of the energy

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อีเมล Paiboon.s@chula.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

... a 3.4% error in the prediction of the fuel consumption, and the maximum error of the voltage prediction is 5.4%. The battery model shows a 2.1% error in prediction of the state of charge, and the maximum error of the voltage prediction is 5.7%. The supercapacitor model shows that the voltage prediction that indicates the state of the stored energy has 2.0% error. In conclusion, the assessments show that the energy source models presented have adequate accuracy and can be applied to the design of the hybrid fuel cell propulsion system.

1. บทนำ

เนื่องด้วยปัจจุบันความต้องการของการใช้ยานพาหนะบนท้องถนนมีมากขึ้นโดยเฉพาะในเขตตัวเมือง ซึ่งจากความต้องการใช้งานยานพาหนะที่มีมากขึ้นเองที่เป็นต้นกำเนิดของมลพิษในรูปแบบต่างๆ เช่น มลภาวะทางอากาศที่เกิดจากก๊าซไอเสียที่เป็นอันตรายที่ถูกปล่อยจากเครื่องยนต์ โดยเฉพาะเครื่องยนต์ที่ขาดการบำรุงรักษา หรือ มลภาวะทางเสียงจากท่อไอเสียที่ไม่ได้มาตรฐาน นอกจากนั้นราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่สูงขึ้นมาโดยตลอด จากปัญหาจากการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในกับยานพาหนะ งานวิจัยซึ่งมุ่งที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวส่วนหนึ่งจึงมุ่งมาที่การพัฒนาขีปนาวุธไฟฟ้า ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างดีเนื่องจากระบบขีปนาวุธไฟฟ้าที่ปราศจากมลพิษทางอากาศในบริเวณที่ใช้งานอย่างสมบูรณ์ รวมถึงมีเสียงจากการทำงานที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน

อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบขีปนาวุธไฟฟ้าจะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้แต่ระบบขีปนาวุธไฟฟ้านั้นยังคงมีข้อจำกัดในหลายๆด้าน เช่น ระยะเวลาในการเติมเต็มพลังงานสำหรับระบบที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานใช้เวลานานมากอย่างเทียบไม่ได้กับการเติมน้ำมันในถังเก็บของ

ระบบที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน รวมถึงมีระยะทางในการขับขี่ที่สั้นเนื่องจากแบตเตอรี่มีความสามารถในการเก็บพลังงานได้น้อย จากข้อจำกัดของระบบขีปนาวุธไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ทางออกหนึ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาอย่างกว้างขวางคือการพัฒนาระบบขีปนาวุธเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงใช้การเก็บพลังงานในรูปแบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจึงสามารถลดข้อจำกัดในด้านระยะเวลาในการเติมเต็มพลังงานรวมถึงระยะการขับขี่ได้อย่างดี อย่างไรก็ตามความสามารถในการให้กำลังของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นยังคงมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นแนวทางการพัฒนาต่อมาจึงมุ่งมาที่การพัฒนาขีปนาวุธขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด ซึ่งเป็นการผสมผสานข้อได้เปรียบในด้านความสามารถในการเติมเต็มและกักเก็บพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงของแบตเตอรี่

จากแนวทางการพัฒนาดังกล่าวจึงนำมาสู่งานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ โดยพิจารณาใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ และใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิ นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor, Ultracapacitor) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าได้ใน

ในการออกแบบแหล่งพลังงานทุกประเภทระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแทนการใช้แบตเตอรี่เช่นกัน

ในการออกแบบระบบขับเคลื่อนนั้นสิ่งหนึ่งที่ช่วยให้สามารถออกแบบระบบได้เหมาะสม สอดคล้องกับเป้าหมายที่กำหนดไว้คือการสร้างแบบจำลองของระบบขับเคลื่อน ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองของระบบย่อยต่างๆ เช่น แบบจำลองภาระการขับเคลื่อน แบบจำลองมอเตอร์ขับเคลื่อน แบบจำลองของแหล่งจ่ายพลังงาน เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองของแหล่งจ่ายพลังงานนั้นถือว่ามีความสำคัญต่อการทำนายสมรรถนะของระบบ การสร้างแบบจำลองที่แม่นยำของแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ในงานวิจัยจึงเป็นสิ่งจำเป็น

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองในรูปแบบต่างๆของแหล่งจ่ายพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด รวมถึงการทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำ โดยแหล่งพลังงานที่พิจารณาประกอบไปด้วยเซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่ และชุดเก็บประจุความจุสูง

2. เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีเพื่อสร้างเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่ใช้การจ่ายพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เหมือนกับแบตเตอรี่ แต่ใช้การเก็บกักเชื้อเพลิง (ก๊าซ

ไฮโดรเจน) เพื่อสำรองไว้สำหรับจ่ายเข้าไปทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อสร้างเป็นพลังงานไฟฟ้าแทน ซึ่งช่วยให้ไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการเติมเต็มพลังงานมากเหมือนแบตเตอรี่และสามารถมาจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ยาวนานตราบเท่าที่ยังมีเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเพียงพอ ซึ่งช่วยให้มีระยะเวลาขับเคลื่อนที่ยาวนาน

เซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นอิเล็กโทรดและสารอิเล็กโทรไลต์ แต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันและมีความเหมาะสมกับงานที่ต่างกัน โดยมากแล้วเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในยานยนต์มักเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane fuel cell หรือเรียกอีกอย่างว่า Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) เนื่องจากเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิการทำงานต่ำ มีโครงสร้างไม่ความซับซ้อน และมีความทนทานเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC จาก Ballard รุ่น NEXA พิกัด 1.2 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงพร้อมชุดระบบย่อยสำหรับการทำงาน มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา (13 กิโลกรัม) และอุณหภูมิการทำงานต่ำ (40°C) ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ และใช้น้ำจากปฏิกิริยากลับมาสร้างความชื้นให้อากาศที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่ต้องใช้น้ำจากแหล่งอื่น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงเหมาะกับการใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่ระบบขับเคลื่อนในรถจักรยานยนต์

2.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

การสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งจะแตกต่างกันออกไปตามแต่วัตถุประสงค์ของการนำมาใช้งาน เช่น Friede และคณะ [1] ได้เสนอแบบจำลองที่ใช้สมการเชิง

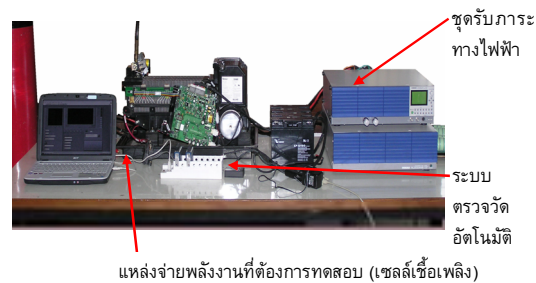
งานของ Gamew และคณะ [2] ได้สร้างแบบจำลองโดยใช้พื้นฐานของสมการทางไฟฟ้าเคมีเช่นกัน นอกจากนี้ Choi และคณะ [3] ได้เสนอแบบจำลองอีกรูปแบบหนึ่งโดยการสร้างวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าโดยใช้ Frequency response analysis นอกจากนี้ Hou และคณะ [4] ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ในสถานะไม่คงตัว

จากเป้าหมายของการสร้างแบบจำลองดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ในงานนี้จึงพิจารณาว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical model) ซึ่งใช้การทดสอบในรูปแบบต่างๆ กับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองนั้นมีความเหมาะสม และให้ความแม่นยำเพียงพอ โดยจะละในส่วนของสถานะไม่คงที่เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ และจากการทดสอบพบว่าแบบจำลองสถานะคงที่ก็ให้ผลที่แม่นยำเพียงพอในสภาวะการทำงานที่กำหนดดังจะแสดงต่อไป การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงจะทำการทดสอบบนพื้นฐานของสภาวะคงที่ โดยจะประกอบไปด้วย 1) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้า 2) การทดสอบเพื่อหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3) ประสิทธิภาพต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายการทำงานที่สภาวะต่างๆ ได้

2.2 การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

เพื่อการทดสอบนี้ชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 1 ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นซึ่งประกอบไปด้วย 1) ชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Electronics load) ทำ

หน้าที่ในการจำลองค่าภาระในรูปแบบต่างๆ ให้แก่แหล่งจ่ายพลังงานที่นำมาทดสอบ 2) ระบบตรวจวัดอัตโนมัติใช้เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในตำแหน่งใดๆ ที่ต้องการซึ่งสามารถเชื่อมต่อข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Labview 3) แหล่งจ่ายพลังงานที่ต้องการทดสอบซึ่งในหัวข้อนี้คือเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 1 ชุดทดสอบแหล่งจ่ายพลังงาน

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนแรกที่จะพิจารณาคือการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ เพื่อสร้างแผนภาพระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า Polarization curve โดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าในการกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ค่าต่างๆ ตลอดช่วงการทำงานตั้งแต่ศูนย์ไปจนถึงค่าภาระสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถจ่ายได้ โดยในแต่ละค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนดนั้น จะทำการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าและอัตราการใช้เชื้อเพลิงในขณะที่การทำงานเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าได้จากผลคูณของแรงดันที่วัดได้กับกระแสไฟฟ้า โดยค่ากำลังไฟฟ้านั้นสามารถแยกออกเป็น 2 ตำแหน่งการวัดคือ 1) จำนวนจากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากตัวแผงเซลล์เชื้อเพลิง (Stack) ซึ่งสามารถเก็บค่าได้โดยใช้ซอฟต์แวร์เชื่อมต่อจากผู้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิง และ 2) จำนวนจากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่

ค่าใช้จ่ายในการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งค่า
 กำลังไฟฟ้าสุทธิที่วัดจากทางออกนี้จะมีค่าน้อย
 กว่าค่าที่วัดได้จากแผงของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะ
 กำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะต้องสูญเสียไปกับการ
 ทำงานของอุปกรณ์ภายในเซลล์เชื้อเพลิง ใน
 ส่วนของค่าประสิทธิภาพที่ค่าการจ่าย
 กระแสไฟฟ้าต่างๆสามารถแยกออกเป็นสอง
 ตำแหน่งการวัดเช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้า
 โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 1 และ 2

$$\eta_{stack} = \frac{P_{stack}}{\dot{N}(LHV)} \quad (1)$$

$$\eta_{out} = \frac{P_{out}}{\dot{N}(LHV)} \quad (2)$$

โดยที่

η_{stack} , η_{out} คือ ประสิทธิภาพโดยคิดที่ Stack
 และ ที่ output

P_{stack} , P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าที่ Stack และ ที่
 output

$\dot{N}$ คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิงเชิงโมล
 (โมลต่อวินาที)

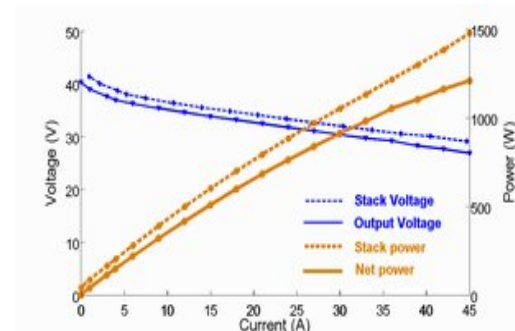
LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของการทำ
 ปฏิกิริยาของก๊าซ

เชื้อเพลิงต่อโมล (241.8×10^3 จูลต่อโมล)

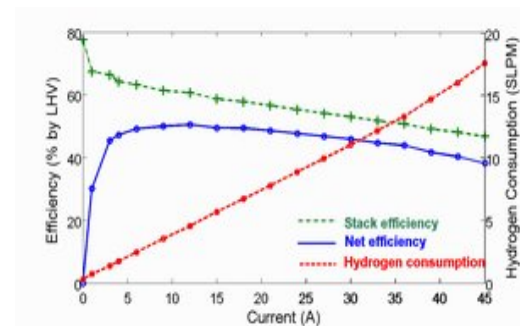
ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าและ
 กำลังไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าต่างๆทั้งสองตำแหน่ง
 การวัดแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์
 เชื้อเพลิงให้กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์เชื้อเพลิงได้
 สูงสุดที่ 1.5 กิโลวัตต์ และให้กำลังไฟฟ้าสุทธิ
 สูงสุด 1.2 กิโลวัตต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ระบุ
 จากผู้ผลิต และผลการทดสอบอัตราการใช้
 เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพ แสดงในรูปที่ 3 ซึ่ง
 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพสุทธิสูงสุดของชุด

วารสารวิจัยพลังงาน ปีที่ 6 ฉบับปี 2552/1

เซลล์เชื้อเพลิงนี้ ซึ่งได้ประสิทธิภาพสูงสุดถึงกว่า
 50% ที่กำลังสุทธิ 0.5 กิโลวัตต์ และอัตราการใช้
 เชื้อเพลิงมีมากขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยมี
 ค่าสูงสุดที่ 17.6 Standard liters per minute (SLPM)



รูปที่ 2 Polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิง

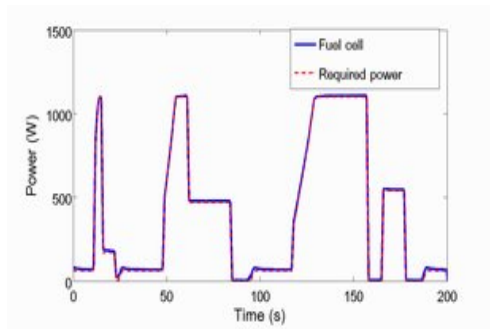


รูปที่ 3 อัตราการใช้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

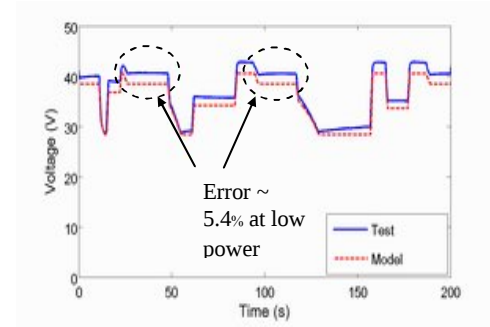
2.3 การประเมินแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

หลังจากที่ได้ผลการทดสอบดังที่แสดงใน
 หัวข้อที่ 2.2 สามารถนำผลแรงดันไฟฟ้าและอัตรา
 การใช้เชื้อเพลิงจากการทดสอบที่สภาวะคงที่
 ดังกล่าวมาสร้างเป็นแบบจำลองการจ่ายพลังงานของ
 เซลล์เชื้อเพลิงได้ และจากนั้นได้ประเมินความ
 แม่นยำของแบบจำลองโดยใช้การเปรียบเทียบผลที่
 ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงที่
 กำหนดให้มีการทำงานแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งวัฏจักรที่
 ใช้นั้นคำนวณจากกำลังขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับ
 ทดสอบ ECE-15 ซึ่งเป็นวัฏจักรขับทดสอบที่ถูก
 พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขึ้นในเมือง แต่ในการ

วัตต์
 ของแบตเตอรี่เชื้อเพลิงสูงถึงหกเซลล์เชื้อเพลิง
 สามารถจ่ายได้โดยไม่เกิดความเสียหายแก่ตัว
 เซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนั้นแล้วการทดสอบ
 แบบเป็นวัฏจักรยังสามารถบ่งชี้ถึงความสามารถ
 ในการตอบสนองต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าที่
 เปลี่ยนแปลงว่าตอบสนองได้รวดเร็วหรือไม่
 โดยในรูปที่ 4 แสดงกำลังไฟฟ้าที่กำหนดผ่าน
 ชุดรับภาระทางไฟฟ้าควบคู่กับกำลังไฟฟ้าที่
 เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายออกมา ซึ่งจะพบว่าเซลล์
 เชื้อเพลิงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าตามความ
 ต้องการได้อย่างรวดเร็ว และรูปที่ 5 แสดงผล
 การทำนายแรงดันไฟฟ้าด้วยแบบจำลองจากผล
 การวัดการทำงานที่สภาวะคงตัวเปรียบเทียบกับ
 ค่าที่วัดได้จริงจากการทำงานแบบเป็นวัฏจักร
 พบว่าการทำงานค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่ผิดพลาด
 สูงสุดเพียง 5.4 % ในช่วงที่ภาระต่ำ ในส่วนของ
 การทำนายปริมาณการใช้เชื้อเพลิงตามการ
 ทำงานเป็นวัฏจักร พบว่าผลการทำนายที่ได้มีค่า
 ผิดพลาดจากการวัดจริงเพียง 3.4 %



รูปที่ 4 การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์
 เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15



รูปที่ 5 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองแรงดันไฟฟ้ากับ
 ค่าที่วัดได้จริงของเซลล์เชื้อเพลิง

จากผลการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงและผล
 การสอบทวนแบบจำลองดังกล่าวนี้ สามารถกล่าว
 ได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้นั้นสามารถตอบสนอง
 ต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วพอที่จะ
 นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับยานยนต์ และ
 แบบจำลองแบบสภาวะคงตัวก็สามารถใช้ทำนาย
 สมรรถนะการจ่ายกำลังไฟฟ้าและระดับ
 แรงดันไฟฟ้ารวมทั้งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับ
 การทำงานเป็นวัฏจักรได้อย่างแม่นยำ

3. แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน
 หลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีข้อได้เปรียบและข้อจำกัด
 แตกต่างกันไปเช่น แบตเตอรี่ชนิดน้ำกรด-ตะกั่ว
 มีข้อดีคือราคาถูกเนื่องจากวัสดุที่ใช้ผลิตหาได้ง่าย
 และมีราคาถูก รวมถึงมีขนาดความจุต่างๆให้เลือกใช้
 แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่คือมีอายุการใช้งานสั้นและต้องใช้
 เวลาในการประจุนานรวมทั้งยังต้องมีการบำรุงรักษา
 โดยการเติมน้ำกลั่นให้กับแบตเตอรี่ตลอดอายุการใ้
 งาน โดยต่อมาจึงมีการพัฒนาแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่ว
 แบบผนึก (Sealed lead-acid battery) ซึ่งมีอายุการใ้
 งานที่นานขึ้นและไม่ต้องมีการบำรุงรักษา

จะกั
แบบ Deep cycle ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าโดยเฉพาะ ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะคือ สามารถจ่ายพลังงานได้ลึกจนระดับการประจุลดลงเข้าใกล้ศูนย์ได้โดยยังคงอายุการใช้งานที่ยาวนาน ด้วยคุณสมบัตินี้ แบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่วแบบ Deep cycle จึงถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในรถกอล์ฟและรถพอล์ฟลิฟต์ นอกจากนั้นมีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-แคดเมียม (Nickel Cadmium battery) ซึ่งมีข้อดีคือมีพลังงานจำเพาะสูงกว่าแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่วมาก (40-55 วัตต์ต่อกิโลกรัม สำหรับ แบตเตอรี่นิเกิล-แคดเมียม และ 20-35 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม สำหรับ แบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่ว) [5] อายุการใช้งานที่นานสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง และมีการคายประจุในตัวเองน้อย แต่ยังคงมีราคาแพงมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่ว ต่อมาได้มีแบตเตอรี่ชนิด นิเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Nickel Metal Hydride battery) ซึ่งมีข้อดีคือ มีพลังงานจำเพาะและกำลังจำเพาะสูงกว่า แบตเตอรี่นิเกิล-แคดเมียม (~65 วัตต์ต่อกิโลกรัม) สามารถประจุพลังงานได้ภายในเวลาอันสั้น และอายุการใช้งานยาวนาน แบตเตอรี่นิเกิล-เมทัลไฮไดรด์จึงถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฮบริดอย่างแพร่หลายเช่น รถยนต์ไฮบริดรุ่น Insight ของ Honda และ รุ่น Prius ของ Toyota แต่แบตเตอรี่นิเกิล-เมทัลไฮไดรด์ ก็ยังคงมีข้อจำกัดในด้านราคาสูง

แบตเตอรี่อีกชนิดหนึ่งที่ถูกมองว่าสามารถนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต คือ

แบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium battery) เป็นแบตเตอรี่ที่มีพลังงานจำเพาะและกำลังจำเพาะที่สูงมาก (~90 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม, 300 วัตต์ต่อกิโลกรัม) [5] มีอัตราการคายประจุในตัวเองน้อยมากและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ใช้แพร่หลายอย่างมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ในพิกัดความจุพลังงานมากๆนั้น ยังไม่เป็นที่แพร่หลายและมีราคาที่แพงมาก จึงยังไม่เป็นที่แพร่หลายในงานขับเคลื่อนยานยนต์

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ โดยแบตเตอรี่นั้นถูกมองว่าใช้เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิซึ่งทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสริมให้กับระบบขับเคลื่อนในขณะที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้ามากเท่านั้น ดังนั้น แบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง จะไม่มุ่งเน้นที่แบตเตอรี่ที่มีสมรรถนะสูงมากนัก แต่จะเน้นรูปแบบที่หาได้ง่ายในท้องตลาดและมีราคาไม่แพง ดังนั้นจึงเลือกใช้แบตเตอรี่แบบน้ำกรดตะกั่วแบบผนึกแบบลิ้นควบคุม (Valve regulated lead acid) ขนาด 18 แอมแปร์-ชั่วโมง จำนวนสี่ชุดมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิ เพราะมีราคาไม่แพงและหาได้ง่ายในท้องตลาด ขนาดและน้ำหนักมีความเป็นไปได้สำหรับการติดตั้งในรถจักรยานยนต์ และมีความสะดวกในการใช้งาน

3.1 แบบจำลองของแบตเตอรี่น้ำกรดตะกั่ว

การสร้างแบบจำลองของแบตเตอรี่ที่แม่นยำนั้นมีความสำคัญต่อการจำลองระบบขับเคลื่อนเนื่องจากช่วยให้สามารถทราบถึงสมรรถนะโดยรวมของระบบขับเคลื่อน เช่น มีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากเท่าไรหรือสามารถนำพลังงานจากการหยุดรถกลับมาใช้ได้มีประสิทธิภาพเพียงไร เป็นต้น และช่วยให้สามารถกำหนดกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานได้เหมาะสม กับขนาดของแบตเตอรี่ที่

นั้น
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายผลของระดับการประจุ และ แรงดันไฟฟ้า ที่ภาระการทำงานต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเป็นการยากที่จะสามารถสร้างแบบจำลองของแบตเตอรี่ให้สามารถทำนายการทำงานของแบตเตอรี่ได้ในขนาดและชนิดต่างๆ กัน รวมถึงเป็นการยากที่จะสามารถทำนายการทำงานได้ครอบคลุมตลอดช่วงการทำงานทั้งหมดในแต่ละระดับการประจุหรือตลอดช่วงกำลังที่จ่ายและรับของแบตเตอรี่

แบบจำลองของแบตเตอรี่นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ ตั้งแต่แบบจำลองอย่างง่ายไปจนถึงแบบจำลองที่มีความซับซ้อน ได้แก่ 1) แบบจำลองแบบความต้านทานภายใน ซึ่งจำลองโดยใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าที่มีอุปกรณ์อยู่สองส่วนคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเทียบเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ (V_{oc}) และตัวต้านทาน (R_i) [6] 2) แบบจำลองธีวินิน (Thevenin battery model) [7] ซึ่งจำลองโดยใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าเช่นเดียวกับแบบจำลองแบบความต้านทานภายในแต่เพิ่มตัวเก็บประจุเข้าไว้ในวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าซึ่งจะแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าในช่วงไม่คงตัว 3) แบบจำลองวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (Resistance-Capacitance model) [8] ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ในวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าเพื่อแทนการลดลงของแรงดันไฟฟ้าหลังจากมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกไป และ 4) แบบจำลองแบบมูลฐาน (Fundamental model) [9] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ศึกษาถึงปฏิกิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่ โดยในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองแบบ

ความต้านทานภายในมาเป็นแบบจำลอง เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่รวมเอาผลของค่าความต้านทานภายในที่ระดับการประจุและกระแสไฟฟ้าต่างๆ เข้าไว้ในแบบจำลองและสามารถทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองได้โดยง่ายดังจะได้กล่าวต่อไป

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในแสดงได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังรูปที่ 6 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) เป็นค่าที่ขึ้นต่อระดับการประจุ ($V_{oc} = f(SOC)$) และค่าความต้านทานภายใน (R_i) เป็นค่าที่ขึ้นต่อระดับการประจุและกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ($R_i = f(SOC, I)$) ระดับการประจุนิยามได้โดย อินทิกรัลของสัดส่วนของกระแสไฟฟ้ากับค่าความจุตลอดช่วงเวลาหนึ่งดังสมการที่ 3 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นสามารถหาได้โดยการทดสอบแบตเตอรี่ซึ่งจะใช้การหาค่า R_i โดยทางอ้อมดังจะได้กล่าวต่อไป

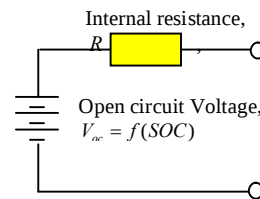
$$SOC = SOC_0 - \int_{t_0}^t \frac{I(t)}{3600C} dt \quad (3)$$

โดย

SOC, SOC_0 คือ ระดับการประจุและระดับการประจุในขณะเริ่มต้นตามลำดับ

$I(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาใด (แอมแปร์)

C คือ ความจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)

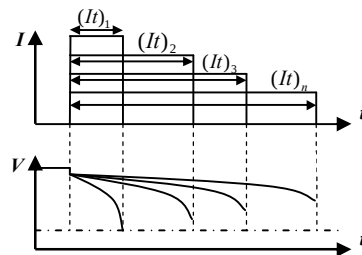


รูปที่ 6 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าสำหรับแบบจำลองแบตเตอรี่

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบตเตอรี่คือการทดสอบเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับนำมาใช้ในแบบจำลอง ซึ่งจะต้องทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะการจ่ายกระแสไฟฟ้าและระดับการประจุต่างๆ สำหรับใช้ในแบบจำลองได้โดยตรง หรือใช้การหาค่าความต้านทานภายในซึ่งหาได้โดยอ้อมโดยการคำนวณจากผล แรงดันไฟฟ้าร่วมกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและระดับการประจุได้เช่นกัน

การทดสอบนั้นสามารถดำเนินการได้โดยกำหนดให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ค่าหนึ่ง พร้อมกับเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (Cut off Voltage) ที่ผู้ผลิตแนะนำสำหรับกระแสที่จ่ายนั้นๆ จึงจะตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า จากนั้นทำการทดสอบซ้ำในลักษณะเดียวกันแต่เปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายดังรูปที่ 7 ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบในงานนี้จะใช้ค่าตั้งแต่ 0.1 เท่าของตัวเลขความจุ แอมป์-ชั่วโมง ไปจนถึง 3 เท่าของตัวเลขความจุ แอมป์-ชั่วโมง โดยในแต่ละครั้งที่สิ้นสุดการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะต้องหยุดการใช้งานแบตเตอรี่เพื่อให้แบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วจึงเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรแล้วสามารถหาค่าระดับการประจุเมื่อสิ้นสุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรต่อระดับการประจุ ซึ่งจากงานวิจัยของ Dürr และคณะ [7] แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

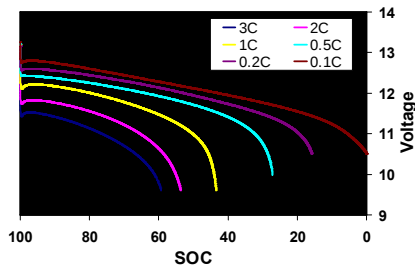
กับระดับการประจุของแบตเตอรี่น้ำกรด-ตะกั่ว นั้นแปรผันกันอย่างเป็นเชิงเส้น ดังนั้นความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงกำหนดได้โดยค่าแรงดันเปิดวงจรขณะประจุเต็ม กับ ค่าแรงดันเปิดวงจรขณะคายประจุจนหมด โดยค่าแรงดันเปิดวงจรขณะคายประจุจนหมดนั้นในที่นี้นิยามโดย การวัดแรงดันเปิดวงจรหลังจากการจ่ายกระแสที่อัตรา 0.1 ของตัวเลขความจุจนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ผู้ผลิตแนะนำ (10.5 โวลต์)



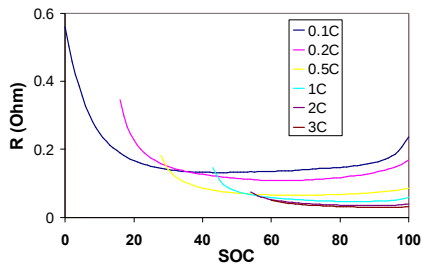
รูปที่ 7 การกำหนดการจ่ายกระแสไฟฟ้าและการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าและระดับการประจุที่เวลาต่างๆสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าและระดับการประจุได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้างานนี้ไปใช้ในแบบจำลองได้โดยตรงหรือสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวนี้มาคำนวณหาค่าความต้านทานภายในต่อกระแสไฟฟ้าและระดับการประจุได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับระดับการประจุและกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ซึ่งที่ระดับการประจุน้อยจะให้ค่าความต้านทานภายในมาก แต่ที่กระแสไฟฟ้ามากขึ้นจะให้ค่าความต้านทานภายในน้อยลงซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานของ Johnson และ คณะ [6] นอกจากนั้นจากผลทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่และผลระดับการประจุเมื่อสิ้นสุดการจ่ายกระแสค่าต่างๆสามารถแสดงขอบเขตของระดับการประจุน้อย

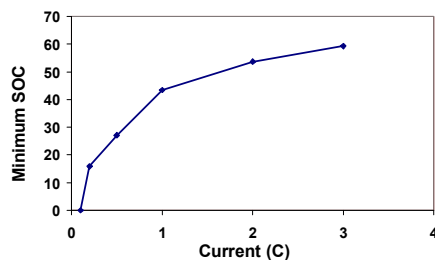
ไม่เกิดรูปที่ 10 โดยเห็นได้ว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าสูงนั้นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้จะมีค่าน้อยลงซึ่งผลดังกล่าวนี้สามารถช่วยในการกำหนดขอบเขตการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ได้เหมาะสมและช่วยป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับแบตเตอรี่



รูปที่ 8 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ



รูปที่ 9 แสดงค่าความต้านทานภายในต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ



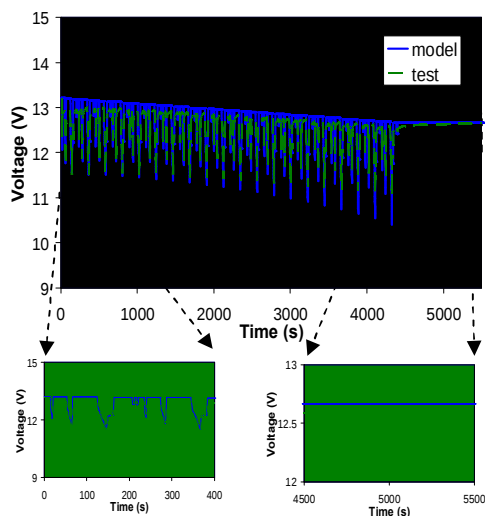
รูปที่ 10 ขอบเขตของระดับการประจุน้อยที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ

3.3 การประเมินแบบจำลองแบตเตอรี่

ในส่วนนี้เป็นการสอบทวนความสามารถของแบบจำลองแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้น โดยการกำหนดให้แบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักร แล้วสังเกตผลของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ รวมถึงสังเกตค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเมื่อสิ้นสุดวัฏจักร ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนี้แสดงถึงความแม่นยำในการทำนายระดับการประจุของแบตเตอรี่ โดยวัฏจักรที่ใช้ทดสอบเพื่อประเมินแบบจำลองแบตเตอรี่นั้นได้จากการจำลองกำลังขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 เช่นเดียวกับการประเมินแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงในหัวข้อที่ 2.3 แต่ในส่วนนี้จะใช้ค่ากำลังไฟฟ้าส่วนที่เกินจากเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายได้มา กำหนดการจ่ายกำลังในการทดสอบแบตเตอรี่และได้ปรับสัดส่วนของกำลังดังกล่าวให้เหมาะสมกับการทดสอบกับแบตเตอรี่หนึ่งชุด นอกจากนั้นจำนวนการวนซ้ำของวัฏจักรที่ใช้ทดสอบเพื่อประเมินนั้นจะต้องมีจำนวนมากพอให้แบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับการประจุอย่างชัดเจนโดยจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุประมาณ 30-40% ซึ่งในส่วนนี้ได้ใช้การทดสอบ 20 วัฏจักรเนื่องจากได้ใช้การคำนวณในเบื้องต้นแล้วพบว่าให้ผลการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุอยู่ในช่วงที่กำหนด

จากรูปที่ 11 แสดงผลเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองและแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ ซึ่งพบว่ามีความแม่นยำดีในขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีความผิดพลาดเพียง 0.2% สำหรับช่วงจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวัฏจักรแรก และในช่วงจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวัฏจักรสุดท้ายพบว่าค่าที่ผิดพลาดมากขึ้นเป็น 5.7% สำหรับ

โดย
ภาพรวมจะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างวัฏจักรแรกมีค่าผิดพลาด 5.1% เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแบตเตอรี่จริงนั้นเข้าสู่สถานะสมดุลได้ช้าแต่สำหรับในแบบจำลองนั้นจะแสดงแรงดันไฟฟ้าที่สถานะสมดุลโดยทันที จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดดังกล่าว และเมื่อสังเกตค่าแรงดันเปิดวงจรที่วัดได้หลังสิ้นสุดวัฏจักรสุดท้าย พบว่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่วัดได้หลังสิ้นสุดวัฏจักรสุดท้ายในทันทีจะมีค่าที่แตกต่างกันกับแบบจำลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งแบตเตอรี่เข้าสู่สถานะสมดุลแล้วค่าที่วัดได้กับค่าจากแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการทำนายระดับการประจุซึ่งมีค่าผิดพลาดเพียง 2.1%



รูปที่ 11 แสดงผลเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ

จากการ ประเมิน นั้น เห็น ได้ ว่าแบบจำลองแบตเตอรี่ให้ความแม่นยำในการทำนายระดับการประจุกับการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบเป็น วัฏจักร ได้ดี แม้ว่าการ ทำนายแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ไม่ได้จ่ายกระแสไฟฟ้า

นั้นยังคงมีความคลาดเคลื่อน แต่ในขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นแบบจำลองสามารถทำนายแรงดันไฟฟ้าได้แม่นยำซึ่งพิจารณาได้ว่าแบบจำลองแบตเตอรี่ที่นำมาใช้สามารถให้ความแม่นยำเพียงพอแก่การช่วยในการออกแบบระบบขับเคลื่อน

4. ชุดเก็บประจุความจุสูง

ชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor, Ultracapacitor) เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งที่ถูกมองว่าสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนเพื่อทำหน้าที่จ่ายกำลังเสริมให้แก่ระบบขับเคลื่อนในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูง มีประสิทธิภาพในการประจุและคายประจุดีและมีค่ากำลังจำเพาะที่สูง (~1-10 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัม) [10] ซึ่งหมายถึงสามารถจ่ายหรือรับกระแสไฟฟ้าได้สูงโดยไม่เกิดความเสียหาย นอกจากนั้นยังเป็นอุปกรณ์ที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานโดยผู้ผลิตแนะนำว่าสามารถใช้ประจุและคายประจุได้ถึงล้านครั้ง แต่ชุดเก็บประจุความจุสูงไม่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายได้เพียงลำพังเนื่องจากมีค่าพลังงานจำเพาะที่ต่ำมาก (~1-10 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม) [10] เมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายอื่น ดังนั้นการใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงจึงมักใช้ในรูปแบบไฮบริด ร่วมกับแหล่งจ่ายอื่นๆเพื่อรองรับภาระสูงๆในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งแหล่งจ่ายอื่นๆ ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอ

ชุดเก็บประจุความจุสูงที่ใช้ทดสอบในงานนี้พิจารณาผลิตภัณฑ์ของ Maxwell รุ่น BCAP 1500 E ขนาด 1500 ฟารัด แรงดันไฟฟ้าสูงสุดต่อหน่วย 2.7 โวลต์ เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าต่อหน่วยน้อย การ

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

ต่อ
แบบอนุกรมเพื่อเก็บประจุไฟฟ้าของพอลิเมอร์และ
จากการที่ต้องทำงานร่วมกันหลายหน่วยนี้เอง
การใช้งานจึงต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มเติมที่เรียกว่า
Balancer ซึ่งจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันของ
แต่ละหน่วยให้เท่ากันตลอดการทำงาน
ข้อพิจารณาอีกจุดหนึ่งก็คือระดับแรงดันไฟฟ้า
ของชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีการแปรเปลี่ยน
อยู่ในช่วงที่กว้าง (0-2.7 โวลต์ per cell) โดยชุด
เก็บประจุความจุสูงเองนั้นสามารถจ่าย
กระแสไฟฟ้าได้จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าลดลง
เหลือศูนย์ แต่ในการใช้งานจริงนั้นแรงดันไฟฟ้า
น้อยสุดถูกจำกัดด้วยปัจจัยหลายอย่างได้แก่ 1)
การใช้งานเป็นชุดโดยต่อแบบอนุกรมนั้นแม้ว่า
มีการใช้ Balancer แต่แรงดันไฟฟ้าในแต่ละ
หน่วยยังคงมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อย ซึ่ง
หากทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าจนกระทั่ง
แรงดันไฟฟ้าของทั้งชุดเข้าใกล้ศูนย์แล้ว หน่วย
ที่มีแรงดันไฟฟ้าน้อยที่สุดจะมีค่าลดลงเป็นศูนย์
ก่อน และหากจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อไป หน่วยที่มี
ค่าแรงดันเป็นศูนย์นั้นจะเหมือนกับถูกป้อน
แรงดันย้อนทิศทางซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหาย
ที่ตัวหน่วยนั้นๆ ได้ 2) อุปกรณ์ Balancer นั้น
จะต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งเพื่อให้
สามารถทำงานได้แต่หากแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำ
Balancer จะไม่สามารถทำงานได้ซึ่งจะมีผลทำ
ให้เกิดแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างหน่วย 3) จาก
การที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีการแปรเปลี่ยน
แรงดันใช้งานอยู่ในช่วงที่กว้าง อุปกรณ์แปลง
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC Converter)
จึงจำเป็นสำหรับการนำชุดเก็บประจุความจุสูง
มาใช้กับระบบขับเคลื่อน ซึ่งโดยมากจะสามารถ

ทำงานได้ที่ช่วงของแรงดันขาเข้าช่วงหนึ่งดังนั้นการ
ใช้งานชุดเก็บประจุความจุสูงจึงถูกจำกัดแรงดัน
ต่ำสุดโดยแรงดันขาเข้าของอุปกรณ์แปลง
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้เอง ดังนั้นจึงกำหนดให้ตัว
เก็บประจุทำงานในช่วง 1.35 ถึง 2.7 โวลต์ ต่อหน่วย

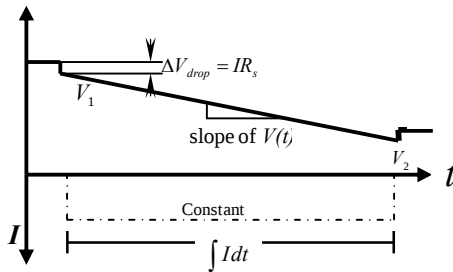
4.1 แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง

แบบจำลองของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้น
จะใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังรูปที่ 12 [11] ซึ่ง
ประกอบไปด้วยความต้านทานภายในแบบอนุกรม
(Internal series resistance) ซึ่งเทียบได้กับการลดลง
ของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า และตัว
เหนี่ยวนำ (Inductance) ซึ่งมีผลต้านทานสูงก็ต่อเมื่อ
มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าสูง และ
ความต้านทานภายในแบบขนาน (Internal parallel
resistance) ซึ่งเทียบได้กับการสูญเสียจากการคาย
ประจุในตัวเอง (self-discharge) ในงานนี้ชุดเก็บ
ประจุความจุสูงถูกใช้งานเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน
เสริมให้กับระบบในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถ
จ่ายได้เพียงพอซึ่งลักษณะการทำงานแบบนี้โดยมาก
จะไม่นำผลของค่าความต้านทานภายในแบบขนาน
มาคิดเพราะว่ามีผลต่อการคำนวณน้อย นอกจากนั้น
ผลของค่าความเหนี่ยวนำก็จะมีนัยสำคัญเฉพาะเมื่อมี
การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าต่อเวลาเร็ว เช่นใน
กรณีการทำงานกับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นเพื่อให้
การคำนวณเป็นไปโดยง่ายจึงพิจารณาเฉพาะผลของ
ความต้านทานภายในแบบอนุกรมและตัวเก็บประจุ
เทียบเท่า



รูปที่ 12 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของชุดเก็บประจุความจุสูง

การทดสอบหาค่าความต้านทานภายในและค่าความจุสามารถทำการทดสอบได้พร้อมๆกันโดยการให้ตัวเก็บประจุจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ค่าต่างๆ ทีละค่าแล้วเก็บ ค่าแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าลดลงถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดในช่วงใช้งาน (Cut off) ดังรูปที่ 13 จากนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานภายในโดยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4 พร้อมกับคำนวณหาค่าความจุโดยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5 [12]



รูปที่ 13 การวัดค่าพารามิเตอร์ของชุดเก็บประจุ ความจุสูงจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่

$$R_{SC} = \frac{\Delta V_{drop}}{I} \quad (4)$$

$$C_{SC} = \frac{\int Idt}{V_2 - V_1} \quad (5)$$

โดย

R_{SC} คือ ความต้านทานภายในของชุดเก็บประจุ ความจุสูง (โอห์ม)

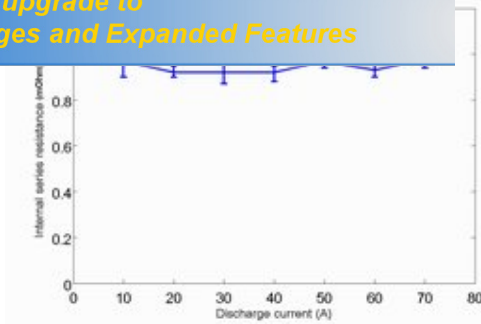
C_{SC} คือ ค่าความจุของชุดเก็บประจุ ความจุสูง (ฟารัด)

ΔV_{drop} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 13

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่าย (แอมแปร์)

V_1 และ V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้า และหลังจ่าย กระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 13

การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานภายในแบบอนุกรมโดยใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ต่างๆ แสดงในรูปที่ 14 โดยพบว่าค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการทดสอบนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่จ่าย และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.94 มิลลิโอม ซึ่งแตกต่างจากค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต (0.63 มิลลิโอม) โดยคิดเป็นค่าที่ต่างกันถึง 49.2 % และเพื่อพิจารณาว่าความแตกต่างที่มีค่าดังกล่าว มีผลต่อการใช้แบบจำลองทำนายผลการทำงานจริงมากน้อยเพียงใด ในงานนี้จึงได้นำค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบและค่าความต้านทานที่ได้จากผู้ผลิตมาใช้กับแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ ที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ พบว่าแบบจำลองที่ใช้ค่าความต้านทานภายในจากการทดสอบให้ผลที่ผิดพลาดจากค่าที่วัดได้จริงเพียง 0.64 % (RMS) และแบบจำลองที่ใช้ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากผู้ผลิตให้ผลที่ผิดพลาดจากค่าที่วัดได้จริงเพียง 0.65 % (RMS) ดังนั้นแม้ว่าค่าความต้านทานภายในที่แตกต่างกันถึง 49.2% แต่ความแตกต่างดังกล่าวนี้มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับการวัดจริงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นมีความต้านทานภายในต่ำมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ ดังนั้นผลของความต้านทานภายในต่อแรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงจึงมีผลน้อย จึงเป็นผลให้ได้การทำนายแรงดันไฟฟ้ายังคงให้ค่าที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าแบบจำลองจะใช้ค่าความต้านทานภายในที่ต่างกัน



รูปที่ 14 แสดงค่าความต้านทานภายในของชุดเก็บประจุความจุสูงจากการทดสอบ โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ

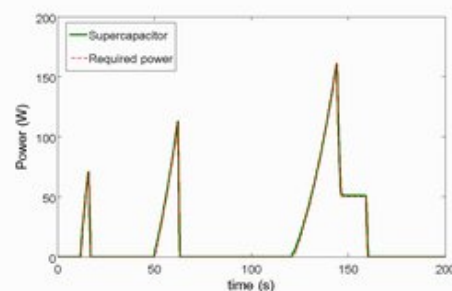
จากการทดสอบหาค่าความจุพบว่าค่าที่ได้ไม่นั้น ไม่ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่าย เช่นเดียวกัน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการทดสอบอยู่ที่ 1558 ฟารัด ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดมาจากผู้ผลิต (1500 ฟารัด) โดยคิดเป็นความแตกต่างกัน 3.7 % และเมื่อนำค่าความจุที่ได้จากการทดสอบและค่าความจุที่ได้จากผู้ผลิตมาใช้กับแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ได้จากการวัดจริงพบว่าแบบจำลองที่ใช้ค่าความจุจากการทดสอบให้ผลที่ผิดพลาดจากค่าที่วัดได้จริงเพียง 0.64 % (RMS) แต่หากใช้ค่าความจุที่ได้จากผู้ผลิตแล้วค่าความผิดพลาดที่ได้คือ 2.17% (RMS)

จากผลทดสอบที่ได้มีความแตกต่างกับค่าของผู้ผลิตนั้น เนื่องจากการทดสอบนั้นกระทำในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน (1.35 ถึง 2.7 โวลต์) ไม่ได้ทดสอบโดยให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจนแรงดันเหลือศูนย์ (0 ถึง 2.7 โวลต์) และการลดลงของแรงดันไฟฟ้าไม่ได้มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นโดยสมบูรณ์ ส่งผลให้คำนวณค่าความจุได้แตกต่างกันหากกำหนดให้แรงดันต่ำสุด (Cut off) ต่างกัน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง จึงจำเป็นที่

ต้องมีการทดสอบหาค่าความจุในช่วงที่ใช้งานเสียก่อนจึงจะสามารถสร้างแบบจำลองได้อย่างแม่นยำ

4.3 การประเมินแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูง

เมื่อได้ทดสอบจนทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของชุดเก็บประจุความจุสูงแล้ว ส่วนต่อมาก็คือการสอบทานความแม่นยำของแบบจำลองโดยพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเพราะเป็นค่าที่บ่งชี้โดยตรงถึงระดับพลังงานสะสมภายในชุดเก็บประจุความจุสูงและเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงต่อการนำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด ซึ่งจะดำเนินการโดยกำหนดให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักร ดังรูปที่ 15 ซึ่งเป็นวัฏจักรที่ได้จากการจำลองกำลังขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 เช่นเดียวกับการประเมินแบบจำลองแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 3.3 แต่ได้กำหนดสัดส่วนให้เหมาะสมกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากชุดเก็บประจุความจุสูงหนึ่งเซลล์และใช้เพียงหนึ่งวัฏจักรในการทดสอบเนื่องจากข้อจำกัดในด้านความจุพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูง จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบผลแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดกับแบบจำลองดังรูปที่ 16 พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำโดยมีความผิดพลาดสูงสุดในช่วงท้ายของวัฏจักรเพียง 2 %

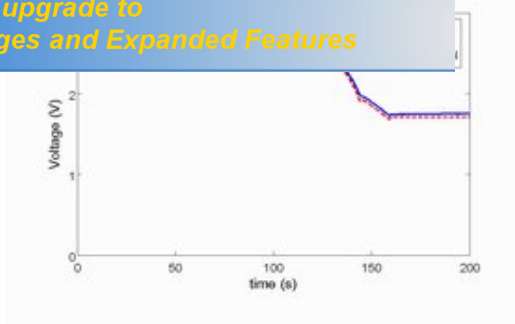


รูปที่ 15 แสดงกำลังไฟฟ้าที่กำหนดให้ชุดเก็บประจุความจุสูงจ่ายกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริง



Your complimentary use period has ended.
Thank you for using PDF Complete.

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features



รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองและจากการวัดจริงของชุดเก็บประจุความจุสูง

จากผลการประเมินนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดสามารถทำนายผลแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานได้อย่างแม่นยำตลอดช่วงการทำงาน

5. สรุป

การสร้างแบบจำลองของแหล่งจ่ายพลังงานที่แม่นยำนั้นมีความจำเป็นสำหรับการจำลองระบบขับเคลื่อน และสามารถใช้เป็นเครื่องมือหรือแนวทางในการออกแบบระบบขับเคลื่อนในรายละเอียดต่อไปได้ โดยในบทความนี้ได้ใช้แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical model) ซึ่งใช้การทดสอบแหล่งพลังงานต่างๆ มาสร้างเป็นแบบจำลอง นอกจากนั้นการทดสอบในรูปแบบต่างๆ กับแหล่งจ่ายพลังงานยังช่วยให้ทราบถึงข้อพิจารณาต่างๆ ของการนำแหล่งพลังงานนั้นมาใช้ เพื่อความเชื่อมั่นในการนำแบบจำลองแหล่งจ่ายพลังงานไปใช้งาน จึงได้ทำการสอบทวนแบบจำลองโดยใช้การจ่ายพลังงานแบบเป็นวัฏจักรซึ่งสอดคล้องกับการนำไปใช้งานในยาน

วารสารวิจัยพลังงาน ปีที่ 6 ฉบับปี 2552/1

ยนต์ ซึ่งพบว่าแบบจำลองของแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสามชนิดได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่ และชุดเก็บประจุความจุสูง ให้ความแม่นยำที่ดีเพียงพอ และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบขับเคลื่อนต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์หลักในงานวิจัยนี้ ได้แก่ชุดเซลล์เชื้อเพลิงและชุดรับภาระทางไฟฟ้า

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนบางส่วนจากโครงการพัฒนาสาริตการใช้ PEMFC ในรถยนต์สามล้อ ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Wolfgang Friede, Stéphane Raëland and Bernard Davat. Mathematical Model and Characterization of the Transient Behavior of a PEM Fuel Cell. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS VOL. 19, NO. 5 (September 2004)
2. JamesGamier, Marie-CecilePera, DanielHissel, AlexandreDeBernardinis, Jean-MarieKauffmann and GerardCoquery. Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell under Transportation Cycle Load.

- IEEE International Symposium on volume 1 (May 2004): pp. 329- 333.
3. Woojin Choi, Prasad N. Enjeti and Jo W. Howze. Development of an Equivalent Circuit Model of a Fuel Cell to Evaluate the Effects of Inverter Ripple Current. Journal of Power Sources Volume 158, Issue 2, (August 2006) : 1324-1332.
4. Yongping Hou, Mingxi Zhuang and Gang Wan. A transient semi-empirical voltage model of a fuel cell stack. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) : pp. 857–862
5. James Larminie and John Lowry. Electric vehicle technology explained. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex : John Wiley & Sons, 2003.
6. V.H. Johnson. Battery performance models in ADVISOR. Journal of Power Sources 110 (2002) : pp. 321–329
7. Matthias Dürr, Andrew Cruden, Sinclair Gair and J.R. McDonald. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. Journal of Power Sources 161 (2006) : pp. 1400–1411
8. Valerie H. Johnson and Ahmad A Pesaran. Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries. The 17th Annual Electric Vehicle Symposium (October 2000)
9. J. N. Harb, V. H. Johnson and D. Rausen. Use of a fundamentally based lead-acid battery model in hybrid vehicle simulations. Annual Electrochemical Society Conference (1999)
10. Iqbal Husain. Electric and hybrid vehicles. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431 : CRC Press LCC, 2003.
11. R. L. Spyker and R. M. Nelms. Classical Equivalent Circuit Parameters for a Double-Layer Capacitor. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems VOL. 36, NO. 3 (JULY 2000)
12. Andrew Chu and Paul Braatz. Comparison of commercial supercapacitors and high-power lithium-ion batteries for power-assist applications in hybrid electric vehicles I. Initial characterization. Journal of Power Sources 112 (2002) : pp. 236–246.