

การวิเคราะห์และออกแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด สำหรับรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก

Analysis and Design of a Hybrid Fuel Cell Propulsion System for Scooter

นาถนรงค์ ลิ้มวุฒิกไกรจิรัฐ นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และ ไพบุญ ศรีภคการ*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
โทร 02-2186595 โทรสาร 02-2522889 อีเมลล์ Paiboon.s@chula.ac.th

Nartnarong Limwuthigrajirat, Nuksit Noomwongs and Paiboon Sripakagorn*

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, 10330, Thailand, Tel: 02-2186595, Fax: 02-2522889, *e-mail: Paiboon.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบเพื่อการพัฒนาแบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดโดยมีชุดเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ โดยมีเป้าหมายที่รถจักรยานยนต์ขนาดเล็กแบบไร้มลพิษ ที่มีสมรรถนะอยู่ระหว่างรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กขนาดเครื่องยนต์ 50 ซีซี กับ 125 ซีซี การประเมินภาระการขับเคลื่อนด้วยวัฏจักรขับทดสอบ ECE 15 ป่งชี้ถึงความจำเป็นของการมีแหล่งพลังงานทุติยภูมิมาทำงานในรูปแบบของระบบไฮบริด สำหรับแหล่งพลังงานทุติยภูมิอินได้แก่แบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor) ได้ทดสอบการทำงานพร้อมสอบทวนความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพบว่าทำงานได้ดีและแบบจำลองมีความแม่นยำที่สุด การจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อน โดยเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการใช้แหล่งพลังงานทุติยภูมิทั้งสองพบว่าทั้งสองระบบต่างสามารถจ่ายภาระการขับเคลื่อนได้อย่างเพียงพอ หากแต่ระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงให้สมรรถนะที่ดีกว่าเป็นอย่างมาก ทั้งในด้านอัตราการใช้เชื้อเพลิงและระยะขับที่ผลสรุปในที่นี้จึงบ่งชี้ว่าการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก ควรใช้ทำงานร่วมกับชุดตัวเก็บประจุความจุสูงเพื่อสมรรถนะและประสิทธิภาพที่ดี

Abstract

This paper presents the analysis and design of a hybrid fuel-cell propulsion system for scooters where a modular 1.2 kW fuel cell system is employed as a primary energy source. The targeted performance of this design is placed between the commercial 50 cc and 125 cc scooters. The assessment of the driving load based on the ECE 15 driving cycle indicates the need for hybrid configuration. Battery and supercapacitor are shown to work adequately as secondary energy storage while

their behaviors can be accurately modeled. The simulations of the entire propulsion system are performed. Both choices of the secondary energy storage are able to perform the task. The fuel cell – supercapacitor hybrid, however, outperforms the fuel cell – battery hybrid, both in terms of the rate of fuel consumption and the range of the vehicles. This paper concludes that, for a fuel cell hybrid scooter, the fuel cell – supercapacitor hybrid is the system of choice.

1. บทนำ

ในประเทศไทยหลังจากช่วงวิกฤตการณ์เศรษฐกิจ ยอดการจำหน่ายรถจักรยานยนต์เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วมาก สำหรับในกรุงเทพมหานคร ในปี พ.ศ. 2548 มีจำนวนรถจักรยานยนต์ถึงประมาณร้อยละ 38 การมีรถจักรยานยนต์เป็นจำนวนมากในกรุงเทพมหานครเป็นต้นกำเนิดของมลพิษจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซพวกไฮโดรคาร์บอน โดยมีปริมาณมากกว่าปริมาณของมลพิษในอากาศที่มาจากรถยนต์ รถบรรทุก และรถโดยสารรวมกัน นอกจากนั้นปัญหามลภาวะทางเสียงที่เกิดจากรถจักรยานยนต์ก็เป็นปัญหาที่สำคัญเช่นกัน การปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณของมลพิษทางอากาศนั้น ส่วนหนึ่งมุ่งมาที่การพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ดี ถึงแม้ยานยนต์ไฟฟ้าจะมีข้อดีเช่น ไร้มลพิษ หรือมีระดับเสียงรบกวนต่ำ แต่ตลาดของรถไฟฟ้ายังจำกัดอยู่มากเนื่องจากการใช้แบตเตอรี่นั้นให้ระยะการขับที่สั้น รวมทั้งการเติมพลังงานด้วยการชาร์จไฟกินเวลานาน ทางออกหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางก็คือการใช้เซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์ ซึ่งถูกมองว่าเป็นทางออกในอนาคตสำหรับระบบขับเคลื่อนในยานยนต์ที่ไร้มลภาวะ งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าปฐมภูมิ ทำงานร่วมกับ

แหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิเพื่อช่วยเสริมกำลังขับเคลื่อน ซึ่งจะได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดแบตเตอรี่และชุดตัวเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor) เป้าหมายของการพัฒนานี้คือรถจักรยานยนต์แบบไร้มลพิษ โดยมีสมรรถนะระหว่างรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กขนาดเครื่องยนต์ 50 ซีซี กับขนาดเครื่องยนต์ 125 ซีซี พร้อมสมรรถนะการขับขี่ที่เทียบเคียงหรือดีกว่ารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าในท้องตลาด แต่ด้วยระยะเวลาขับขี่ที่ยาวไกลกว่า

บทความนี้นำเสนอผลงานส่วนแรกของงานวิจัยนี้ โดยมุ่งไปที่การวิเคราะห์ออกแบบเพื่อการพัฒนาาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด โดยเริ่มด้วยที่แนวทางในการออกแบบระบบในเบื้องต้นในหัวข้อที่ 2 จากนั้น เพื่อการเลือกใช้แหล่งจ่ายพลังงานร่วมกันได้อย่างเหมาะสมในระบบไฮบริด รวมถึงการกำหนดขนาดของแหล่งพลังงาน หัวข้อที่ 3 แสดงผลการทดสอบชุดเซลล์เชื้อเพลิง ชุดตัวเก็บประจุความจุสูง และแบตเตอรี่ เพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการจ่ายกำลังขับเคลื่อน รวมถึงความสามารถของแบบจำลองในการทำนายการทำงานของแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสาม จากนั้น หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอวิธีการออกแบบระบบ พร้อมแบบจำลองของแหล่งจ่ายพลังงานเพื่อจำลองถึงการทำงานร่วมกันในลักษณะต่างๆของแหล่งพลังงาน ซึ่งจะนำมาสู่ข้อสรุปถึงรูปแบบการทำงานของระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดที่ดีที่สุด ในหัวข้อที่ 5 อันจะนำไปสู่การออกแบบรายละเอียดเพื่อการประกอบระบบขึ้นเป็นชุดทดสอบในขั้นตอนต่อไปของงานวิจัยนี้

2. การออกแบบเบื้องต้น

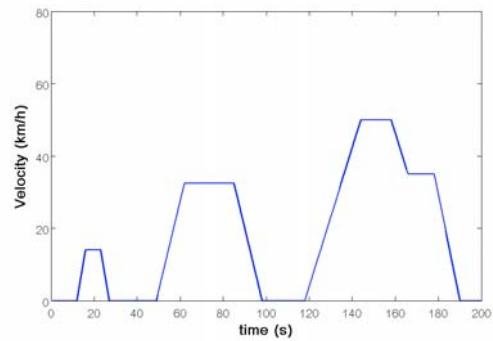
2.1 การกำหนดสมรรถนะสำหรับการออกแบบ

ในการที่จะทำการออกแบบระบบขับเคลื่อนนั้นจะต้องกำหนดสมรรถนะเบื้องต้นที่ต้องการก่อน ซึ่งการกำหนดนั้นอิงกับเป้าหมายของการพัฒนาดังที่กล่าวไว้ในบทนำ โดยแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ การกำหนดค่าสมรรถนะระบุและการกำหนดสมรรถนะโดยใช้วัฏจักรขับขี่ทดสอบ การกำหนดสมรรถนะค่าระบุนั้น จากการสำรวจรถจักรยานยนต์ขนาดเครื่องยนต์ 50 ซีซี 125 ซีซี รวมทั้งจักรยานยนต์ไฟฟ้า ได้สรุปเป้าหมายสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสมรรถนะระบุ

ความเร็วสูงสุด (กม/ชม)	70
ความสามารถในการขึ้นทางชัน (องศา)	40
ความสามารถในการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม/ชม	5
น้ำหนักรถ (กก)	100

นอกจากการกำหนดค่าสมรรถนะระบุข้างต้นแล้ว เพื่อที่จะออกแบบระบบให้สภาวะในการขับเคลื่อนได้อย่างสอดคล้องกับสภาวะการขับขี่จริง จึงจำเป็นที่จะใช้วัฏจักรขับขี่ทดสอบเข้ามาร่วมในการออกแบบระบบ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัฏจักร ECE 15 เป็นพื้นฐานในการจำลองระบบขับเคลื่อน (รูปที่ 1) โดยในปัจจุบัน กรมควบคุมมลพิษใช้วัฏจักร ECE 15 เป็นมาตรฐานการทดสอบมลพิษสำหรับรถจักรยานยนต์



รูปที่ 1 วัฏจักรขับขี่ทดสอบ ECE 15

2.2 การประเมินภาระการขับเคลื่อน

ในการเคลื่อนที่ของรถนั้น ระบบขับเคลื่อนจะต้องสามารถเอาชนะภาระต่างๆที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของรถเพื่อให้รถสามารถเคลื่อนที่ไปได้ตามต้องการ โดยแรงต้านทานต่างๆสามารถแบ่งออกเป็น แรงต้านทานการกลิ้ง (Rolling resistance force, F_r) แรงต้านทานจากอากาศ (Aerodynamic drag force, F_d) แรงในการขึ้นทางลาดชัน (Climbing force, F_{cl}) และแรงเพื่อให้ความเร่ง (Acceleration force) ซึ่งยังประกอบด้วยความเร่งเชิงเส้น F_a และความเร่งเชิงมุมสำหรับล้อ $F_{a,wh}$ และสำหรับตัวแกนมอเตอร์ $F_{a,m}$ ตามลำดับ แรงที่ใช้ขับเคลื่อนทั้งหมดก็คือผลรวมของแรงต้านทานทั้งหมดดังสมการ (1)

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = F_r + F_d + F_{cl} + (F_a + F_{a,wh} + F_{a,m}) \quad (1)$$

กำลังในการขับเคลื่อนคือผลคูณของความเร็ว (v) กับแรงขับเคลื่อนซึ่งจะเท่ากับกำลังที่มอเตอร์ขับเคลื่อนยานยนต์ ดังสมการ (2)

$$P_{m,out} = f_r mgv + \frac{1}{2} \rho AC_d v^3 + mgv \sin(\theta) + (m + \frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2}) \quad (2)$$

โดย ρ คือค่าความหนาแน่นของอากาศ θ คือมุมลาดชัน พร้อมความหมายของตัวแปรอื่นๆตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรในการคำนวณภาระการขับเคลื่อน

มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทุก m	160 กก.
ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานการกลิ้ง f_r	0.01
สัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ C_d	0.75
พื้นที่หน้าตัดของรถ A	0.6 ตร.ม.
เทอมโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อและแกนมอเตอร์ $\frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2}$	5 % ของ m
รัศมีของล้อ r	0.21 ม.
อัตราทดของมอเตอร์ถึงล้อ G	1.9

กำลังที่คำนวณได้จากสมการ (2) เป็นกำลังที่มอเตอร์จะต้องจ่ายออกไปในสภาวะการขับขี่ต่างๆ แต่ด้วยประสิทธิภาพของมอเตอร์

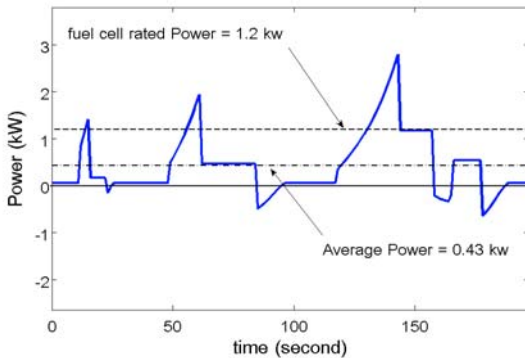
(η_m) นั้นจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงาน คือค่าแรงบิดและความเร็วเชิงมุมที่มอเตอร์ทำงานอยู่ จากสมการ (2) จึงสามารถคำนวณภาระทางไฟฟ้าที่ระบบขับเคลื่อนต้องจ่ายให้แก่มอเตอร์ได้ดังสมการ (3)

$$P_{m,in} = \frac{1}{\eta_m(T,\omega)} \left[f_r m g v + \frac{1}{2} \rho A C_d v^3 + m g v \sin(\theta) + \left(m + \frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2} \right) v \frac{dv}{dt} \right] \quad (3)$$

หากกำลังในการขับเคลื่อนมีค่าน้อยกว่าศูนย์คือเป็นช่วงที่มีการชะลอหรือหยุดรถ การทำงานแบบ regenerative braking ก็สามารถนำพลังงานจากการชะลอตัวมาเก็บเป็นกำลังไฟฟ้าได้ โดยรับพลังงานมาจากมอเตอร์ซึ่งขณะนั้นทำงานเป็นเครื่องผลิตไฟฟ้า ดังสมการ (4)

$$P_{m,regen} = \eta_m(T,\omega) \left[f_r m g v + \frac{1}{2} \rho A C_d v^3 + m g v \sin(\theta) + \left(m + \frac{n_{wh} I_{wh}}{r^2} + \frac{I_m G^2}{r^2} \right) v \frac{dv}{dt} \right] \quad (4)$$

ด้วยค่าตัวแปรที่กำหนดดังตารางที่ 2 พร้อมค่ากำหนดของมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้แปร่ง่านขนาด 5 กิโลวัตต์ ผลการประเมินภาระการขับเคลื่อนสำหรับวัฏจักรขับขี่ ECE15 ได้ดังรูปที่ 2



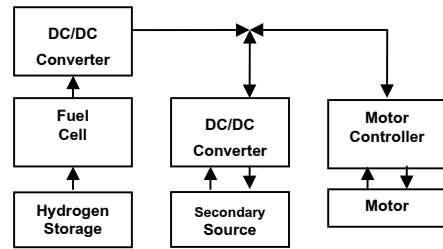
รูปที่ 2 ผลการประเมินภาระการขับเคลื่อนสำหรับวัฏจักรขับขี่ทดสอบ ECE15

2.3 รูปแบบและการจัดวางระบบ

สำหรับระบบขับเคลื่อนในงานวิจัยนี้ โจทย์ตั้งต้นคือการนำชุดเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการขับเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.43 กิโลวัตต์ ดังนั้นหากคิดในเชิงพลังงานต่อวัฏจักรขับขี่ทดสอบแล้ว ชุดเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอ แต่กำลังไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อการขับเคลื่อนในแต่ละเวลานั้นแตกต่างกันได้มาก โดยค่ากำลังสูงสุดต้องการได้ถึง 2.8 กิโลวัตต์ ซึ่งมากกว่าที่เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถจ่ายได้ ดังนั้นหากใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานเดี่ยว ยานยนต์ย่อมจะมีสมรรถนะต่ำ และไม่สามารถขับได้ตามวัฏจักรขับขี่ทดสอบได้ หากต้องการให้มีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเพียงพอแล้ว จำเป็นที่จะต้องมีส่วนจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งอื่นเข้ามาช่วยในการทำงาน ในรูปแบบของระบบไฮบริด

อีกข้อพิจารณาหนึ่งได้แก่รูปแบบทางไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนมีรูปแบบทางไฟฟ้าได้สองรูปแบบคือใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยระบบไฟฟ้ากระแสสลับมีข้อดีที่ีการทำงานที่ระดับแรงดันสูง ทำให้ที่ระดับกำลังหนึ่งๆมีระดับกระแสที่ต่ำ การสูญเสียทางไฟฟ้าในส่วนประกอบต่างๆ รวมถึงความอันตรายทางไฟฟ้าจึงต่ำไปด้วย แต่อย่างไรก็ดี จากการสำรวจเบื้องต้นในตลาดสำหรับระดับกำลัง 3-5 กิโลวัตต์ ราคาของมอเตอร์รวมทั้งชุดควบคุมมอเตอร์ในกรณีของกระแสสลับจะสูงกว่ากรณีของกระแสตรงได้กว่าเท่าตัว รวมทั้งเพื่อความเรียบง่ายในการออกแบบและติดตั้งระบบ งานวิจัยนี้จึงเลือกระบบไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อได้รูปแบบทางไฟฟ้าของระบบแล้ว การจัดวางระบบอาจเป็นได้ดังรูปที่ 3 โดยแหล่งพลังงานปฐมภูมิคือชุดเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งรับพลังงานมาจากถังไฮโดรเจนจะทำงานร่วมกับแหล่งพลังงานทุติยภูมิ โดยการทำงานร่วมกันจะถูกกำหนดด้วยค่าแรงดันสัมพัทธ์ระหว่างแหล่งพลังงานทั้งสอง ซึ่งถูกกำหนดได้ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดัน (DC/DC converter) จากนั้น กำลังในการขับเคลื่อนจะถูกกำหนดและส่งผ่านโดยชุดควบคุมมอเตอร์ไปสู่มอเตอร์ขับเคลื่อนในที่สุด



รูปที่ 3 การจัดวางระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริด

เมื่อได้ข้อสรุปของรูปแบบในระบบไฮบริดแล้ว ก็จำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสม สำหรับในงานวิจัยนี้ แหล่งพลังงานทุติยภูมิชนิดแรกที่พิจารณาได้แก่แบตเตอรี่ ข้อพิจารณาเบื้องต้นเพื่อการติดตั้งในรถจักรยานยนต์ได้แก่ น้ำหนักเบา ขนาดเล็กและราคาย่อมเยา เนื่องจากงานนี้ไม่ได้กำหนดให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ ดังนั้นแบตเตอรี่ lead-acid แบบ deep-cycle ซึ่งมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก หรือแบตเตอรี่ Ni-MH ซึ่งสมรรถนะสูงแต่ราคาแพงกว่ามากก็ไม่จำเป็น ดังนั้นในที่นี้ ตัวเลือกในขั้นต้นได้แก่แบตเตอรี่ lead-acid แบบผนึก (Sealed lead acid หรือ Valve regulated lead acid) ซึ่งเหมาะแก่การจ่ายและรับภาระโดยฉับพลันที่ค่ากระแสสูงมากโดยการใช้งานในยานยนต์ปกติอยู่แล้ว

ในบรรดาทางเลือกของแหล่งพลังงานทุติยภูมิ ชุดเก็บประจุความจุสูงนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้นทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กไปจนถึงระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยโครงสร้างและการทำงานที่ต่างไปจากตัวเก็บประจุทั่วไป ทำให้ชุดเก็บประจุความจุสูงเก็บพลังงานได้ที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงกว่ามาก [1] นอกจากนี้ยังสามารถจ่ายและรับไฟฟ้าได้ที่ค่ากระแสสูงมากได้โดยมีประสิทธิภาพสูงและไม่มีผลต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์

จากการประเมินภาระขับเคลื่อนและการกำหนดรูปแบบระบบข้างต้น ทำให้สามารถกำหนดขนาดเบื้องต้นของแหล่งพลังงานทุติยภูมิ ได้

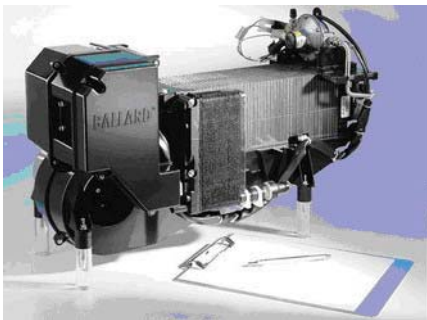
โดยจากรูปแบบทางไฟฟ้ากระแสตรง ค่าแรงดันทำงานถูกกำหนดไว้ที่ 36 โวลต์ ดังนั้นแบตเตอรี่มาตรฐานสำหรับรถจักรยานยนต์ขนาด 12 V 18 Ah จำนวน 3 ตัวสามารถจ่ายภาระการขับเคลื่อน (รูปที่ 2) ที่นอกเหนือจากค่าภาระเฉลี่ยได้อย่างเพียงพอ โดยในที่นี้เลือกใช้แบตเตอรี่ Vision รุ่น CP12180 สำหรับชุดตัวเก็บประจุความจุสูงนั้น ในเบื้องต้นได้พิจารณาผลิตภัณฑ์ของ Maxwell และได้เลือกอนุกรม BCAP ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ทำงานที่ระดับแรงดันตัวละ 2.7 โวลต์ และด้วยภาระทางไฟฟ้าที่ต้องจ่าย การออกแบบบ่งชี้ว่าชุดตัวเก็บประจุความจุสูงในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุความจุสูงรุ่น BCAP1500E ขนาด 1500 F ต่ออนุกรมกัน 14 ตัว

3. การทดสอบแหล่งพลังงาน

จากการกำหนดรูปแบบและการจัดวางระบบขับเคลื่อนในหัวข้อ 2 ก่อนที่จะได้ออกแบบรายละเอียดและประกอบแหล่งพลังงานพร้อมอุปกรณ์ประกอบต่างๆเข้าเป็นระบบขับเคลื่อน การจำลองการทำงานของระบบอย่างแม่นยำเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อยืนยันถึงความสามารถที่คาดหวังได้ของระบบ รวมทั้งระบุถึงกลยุทธ์ที่กำหนดถึงการทำงานร่วมกันของแหล่งพลังงานปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่อย่างไรก็ดี การจำลองการทำงานของระบบต้องการข้อมูลตั้งต้น อันได้แก่ความเข้าใจถึงการทำงานของ พารามิเตอร์การออกแบบต่างๆรวมทั้งความสามารถของแบบจำลองในการทำนายทำงานของแหล่งพลังงานย่อย ในส่วนนี้เป็นการทดสอบแหล่งจ่ายพลังงานประกอบด้วยการทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายพลังงานปฐมภูมิซึ่งก็คือเซลล์เชื้อเพลิง และการทดสอบแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิได้แก่ แบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูง

3.1 การทดสอบชุดเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton exchange membrane ของ Ballard รุ่น Nexa ขนาด 1.2 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงพร้อมชุดระบบย่อยสำหรับการทำงานมีขนาดและน้ำหนักไม่มากและอุณหภูมิการทำงานที่ไม่สูง ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ และใช้ไอน้ำจากปฏิกิริยากลับมาสร้างความชื้นให้อากาศที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่ต้องนำจากแหล่งภายนอก ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงเหมาะกับการใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์ โดยลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงนี้แสดงในตารางที่ 3 [2]



รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย [2]

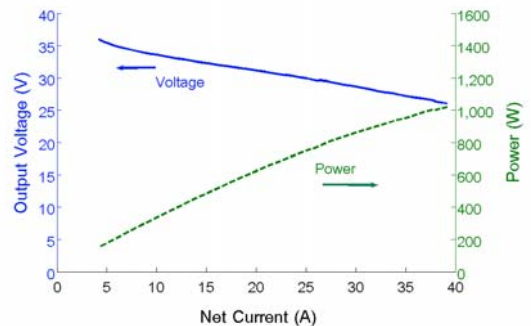
เพื่อที่จะทราบลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ข้อมูลพื้นฐานส่วนหนึ่งได้แก่ Polarization curve ซึ่งแสดงการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อ

กระแสไฟฟ้าที่จ่ายในการทำงานที่ภาระคงที่ต่างๆ (รูปที่ 5) โดยได้แสดงค่ากำลังไว้พร้อมด้วยกัน

ตารางที่ 3 ลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิง

ขาออก	ค่ากำลังขาออกระบุ	1200 วัตต์
	แรงดันขาออก	22-50 โวลต์
ขาเข้า	ไฮโดรเจน	ความบริสุทธิ์ 99.99%
	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	18 SLPM
กายภาพ	ขนาด กว้างxยาวxสูง	56x25x33 ซม
	น้ำหนักรวม	13 กก

จากการทำงานดังกล่าว ด้วยความเป็นเชิงเส้นของ Polarization curve แบบจำลองที่ง่ายที่สุดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงได้แก่แบบจำลองเชิงเส้นระหว่างค่าแรงดันกับค่ากระแส ซึ่งเมื่อพิจารณาในช่วงที่ใช้งาน ซึ่งคือช่วงค่ากระแส 5 ถึง 40 แอมป์ ให้ผลที่คลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 % สำหรับการทำนายแรงดันและการทำนายค่ากำลังขาออก



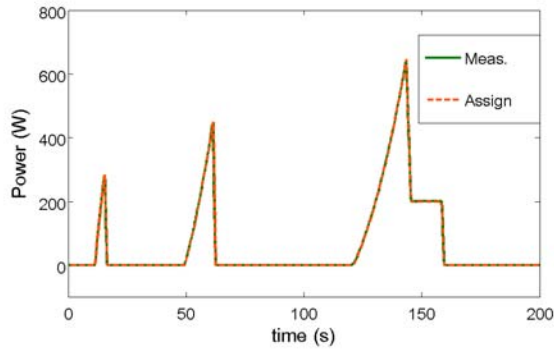
รูปที่ 5 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกำลังที่ชุดเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายแก่ภาระภายนอกต่อค่ากระแสต่างๆ

3.2 การทดสอบแบตเตอรี่

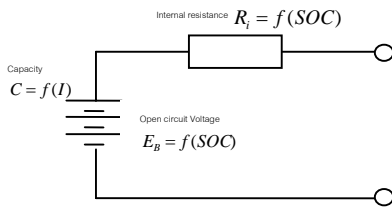
คำถามแรกสำหรับแหล่งพลังงานทุติยภูมิได้แก่ความสามารถในการจ่ายภาระสูงสุดที่ระบบขับเคลื่อนต้องการ เพื่อตอบคำถามดังกล่าว แบตเตอรี่ได้ถูกต่อเข้ากับชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Electronic load) ซึ่งถูกกำหนดโปรแกรมภาระทางไฟฟ้าในรูปแบบเฉพาะ ในงานนี้ใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าของ Kikusui รุ่น PLZ1004W และชุดเพิ่มกำลังไฟฟ้า (Load Booster) รุ่น PLZ2004WB จำนวน 2 ตัว ทำให้มีพิกัดภาระรวมอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์ รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายได้กับกำลังไฟฟ้าที่กำหนดผ่านชุดรับภาระทางไฟฟ้า โดยพบว่าแบตเตอรี่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าตามที่กำหนดได้อย่างรวดเร็วและได้ในระดับใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดมาก

คำถามต่อมาได้แก่ความสามารถของแบบจำลองในการทำนายนการทำงานของแบตเตอรี่ ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองของแบตเตอรี่นั้นจะใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (รูปที่ 7) [3] ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (E_s) และตัวต้านทาน (R_s) ซึ่งเทียบได้กับความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ โดยค่าพารามิเตอร์ในวงจรไฟฟ้าเทียบเท่านี้จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามระดับการประจุของแบตเตอรี่

(State of charge, SOC) ด้วย โดยความจุของแบตเตอรี่ก็จะแปรเปลี่ยนตามขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่าย



รูปที่ 6 ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (Meas.) เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่กำหนดผ่านชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Assign)

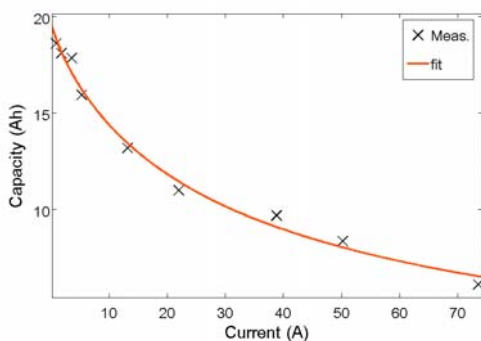


รูปที่ 7 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของแบบจำลองแบตเตอรี่

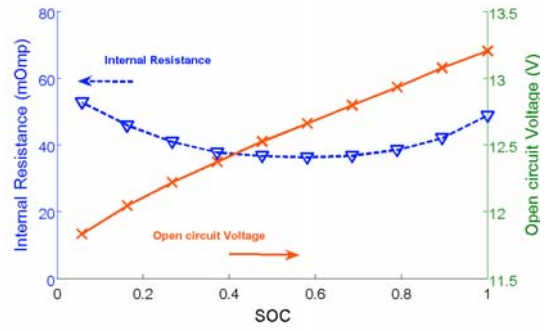
การทดสอบแบบจำลองของแบตเตอรี่ในครั้งแรก จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การออกแบบ อันประกอบด้วย 1) การทดสอบค่าความจุของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ 2) การทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรในแต่ละระดับการประจุ 3) การทดสอบค่าความต้านทานภายในในแต่ละระดับการประจุ

จากการทดสอบกับแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายได้ดังรูปที่ 8 โดยระดับการประจุขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เวลาใดๆสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5) และ การทดสอบได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกับระดับการประจุ และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในกับระดับการประจุ ดังรูปที่ 9 โดยผลไม่ขึ้นกับค่ากระแสที่จ่าย ณ ขณะหนึ่งๆมากนัก

$$SOC = SOC_0 - \int_{t_0}^t \frac{I(t)}{C(I)} dt \quad (5)$$

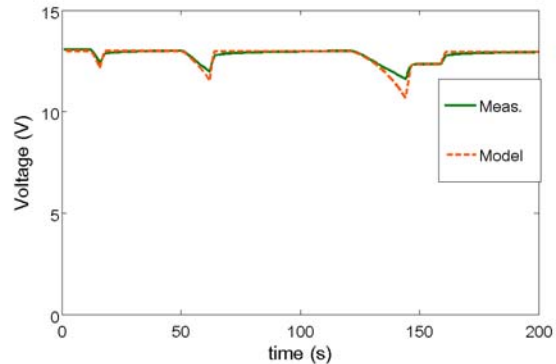


รูปที่ 8 ค่าความจุของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 9 ค่าแรงดันเปิดวงจรและความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ที่ระดับการประจุค่าต่างๆ

เมื่อได้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดสอบแล้ว จึงสามารถทำนายการทำงานจ่ายภาระดังรูปที่ 6 ได้ด้วยแบบจำลองข้างต้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าตามลักษณะการกำหนดภาระดังรูปที่ 10 ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงระดับการประจุของแบตเตอรี่ ผลจากแบบจำลองให้การประมาณการทำงานได้ค่อนข้างดี และมีค่าที่ผิดพลาดสูงที่สุดเพียง 8 % ในกรณีนี้ ดังนั้นสรุปได้ว่าแบตเตอรี่สามารถทำงานจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และแบบจำลองที่เลือกใช้สามารถทำนายการทำงานได้อย่างแม่นยำ

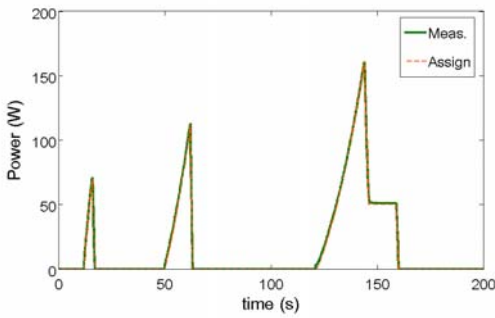


รูปที่ 10 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแบตเตอรี่ (Meas.) เทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลอง (Model)

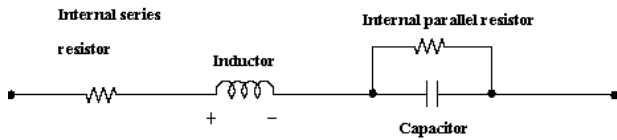
3.3 การทดสอบชุดเก็บประจุความจุสูง

ในลักษณะเดียวกันกับชุดแบตเตอรี่ การทดสอบแรกสำหรับชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นคือการทดสอบการจ่ายภาระสูงสุด ด้วยลักษณะโปรแกรมภาระทางไฟฟ้าที่คล้ายคลึงกันแต่จำกัดสัดส่วนให้เหมาะสมกับการทดสอบกับตัวเก็บประจุความจุสูงครั้งละหนึ่งตัว รูปที่ 11 แสดงตัวอย่างผลการจ่ายภาระของตัวเก็บประจุความจุสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจ่ายภาระที่ดีที่ทัดเทียมกับชุดแบตเตอรี่ในรูปที่ 6

ในส่วนต่อมาได้แก่การทดสอบแบบจำลอง ในงานนี้ แบบจำลองของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นจะใช้วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังรูปที่ 12 ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานภายในแบบอนุกรม (Internal series resistance) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ซึ่งมีผลต้านทานสูงก็เมื่อต่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าสูง และความต้านทานภายในแบบขนาน (Internal parallel resistance) ซึ่งเทียบได้กับการสูญเสียจากการคายประจุในตัวเอง (self-discharge)



รูปที่ 11 ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุความจุสูง (Meas.) เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่กำหนดผ่านชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Assign)



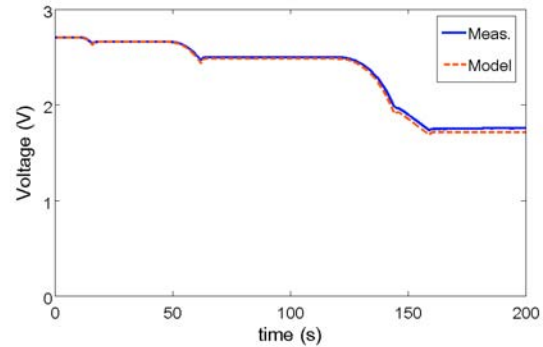
รูปที่ 12 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของชุดเก็บประจุความจุสูง

เนื่องจากในงานนี้ แนวคิดการออกแบบกำหนดให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานรับภาระสูงสุด คือมีการจ่ายภาระสูง แต่ในช่วงเวลาสั้น ซึ่งในลักษณะนี้ โดยมากจะไม่นำผลของค่าความต้านทานภายในแบบขนานมาคำนวณเนื่องจากมีผลต่อการคำนวณน้อย และผลของค่าความเหนี่ยวนำก็จะมีน้อยสำคัญเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าต่อเวลามาก เช่นในกรณีการทำงานกับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะค่าความต้านทานภายในแบบอนุกรม

การทดสอบชุดเก็บประจุความจุสูงในส่วนแรกเป็นการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ออกแบบ ได้แก่ ค่าความต้านทานภายในแบบอนุกรม และค่าความจุ การทดสอบพบว่าค่าทั้งสองไม่ขึ้นกับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่าย และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.94 mΩ และ 1558 F ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต คือ 0.63 mΩ และ 1500 F และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบและค่าที่ได้จากผู้ผลิตมาใช้กับแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ได้จากการวัดจริง พบว่าความแตกต่างของค่าความต้านทานภายในนั้นมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับการวัดจริงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การใช้ค่าความจุที่ได้จากผู้ผลิตแล้วค่าความผิดพลาดที่ได้มากกว่า ดังนั้นการใช้แบบจำลองชุดเก็บประจุความจุสูงจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหาค่าความจุในช่วงที่ใช้งานเสียก่อนจึงจะสามารถให้ผลการจำลองการทำงานได้อย่างแม่นยำ

เมื่อทราบถึงพารามิเตอร์ออกแบบของชุดเก็บประจุความจุสูงแล้ว การทดสอบส่วนที่เป็นการสอบทานถึงความแม่นยำของแบบจำลอง โดยจะพิจารณาถึงค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงระดับพลังงานที่มีอยู่ของชุดเก็บประจุความจุสูง ด้วยการจ่ายภาระในรูปแบบของรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างผลการวัดและผลการทำนายดังรูปที่ 13 พบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง และให้ความผิดพลาดในช่วงท้ายของวัฏจักรสูงที่สุดที่ 2% ดังนั้น ในส่วนนี้สรุปได้ว่าชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถทำงานจ่ายภาระทางไฟ

ฟ้าได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และแบบจำลองที่เลือกใช้สามารถทำนายการทำงานได้อย่างแม่นยำหากมีการวัดพารามิเตอร์การออกแบบต่างๆได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 13 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดเก็บประจุความจุสูง (Meas.) เทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลอง (Model)

4. การจำลองระบบขับเคลื่อน

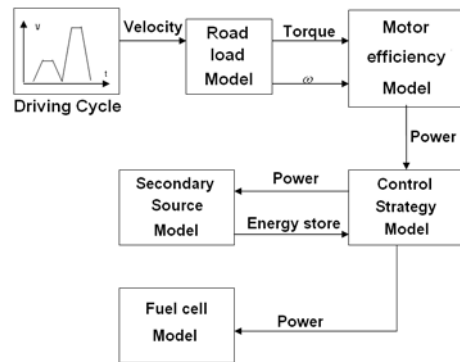
จากรูปแบบระบบและการยืนยันถึงการดำเนินงานได้ของแหล่งพลังงานปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในส่วนนี้จะได้จำลองการทำงานของทั้งระบบขับเคลื่อน โดยมีเป้าหมายอยู่ที่การปรับกลยุทธ์การทำงานร่วมกันระหว่างแหล่งพลังงานให้เหมาะสมที่สุด และให้การดำเนินงานถึงสมรรถนะโดยรวมของระบบขับเคลื่อนที่น่าจะทำได้

4.1 แนวทางการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อน

การจำลองการขับเคลื่อนเพื่อหาค่าภาระหรือการจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นทำได้โดยนำแบบจำลองของแต่ละส่วนประกอบย่อยๆมาประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 14 โดยการจำลองแบบในงานนี้ทำด้วยโปรแกรม Matlab / Simulink

4.2 กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานในระบบไฮบริด

การออกแบบระบบการจ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายมากกว่าหนึ่งชนิดหรือระบบไฮบริดนั้นต้องมีการกำหนดกลยุทธ์เพื่อกำหนดการใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายต่างๆให้สอดคล้องกับภาระทางไฟฟ้าที่ต้องใช้ และระดับพลังงานที่สะสมอยู่ในแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิ รวมถึงภาระทางไฟฟ้าสูงสุดที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าทุติยภูมิสามารถจ่ายได้



รูปที่ 14 แบบจำลองของระบบขับเคลื่อน

4.2.1 กลยุทธ์ในระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดแบตเตอรี่

ในส่วนแรก พิจารณาการออกแบบภาระเฉลี่ย ชุดเซลล์เชื้อเพลิง จะถูกกำหนดให้จ่ายภาระเฉลี่ย ด้วยจุดเด่นที่ประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูงและข้อจำกัดที่มีความไวในการจ่ายภาระฉบับพลันต่ำ ซึ่งการทดสอบพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพสูงที่ภาระต่ำ แต่ด้วยภาระเฉลี่ยนี้ ต้องจ่ายทั้งภาระการขับเคลื่อนและการเติมพลังงานแก่แหล่งพลังงานทุติยภูมิ ในที่นี้กำหนดให้ภาระเฉลี่ยอยู่ที่ ประมาณ 400 วัตต์

ภาระเหนือภาระเฉลี่ยคือภาระสูงสุดที่แหล่งพลังงานทุติยภูมิต้องรับ สำหรับแบตเตอรี่นั้น เมื่อได้พิจารณาถึงความสามารถในการจ่ายภาระสูงสุดแล้ว พบว่ามีข้อจำกัดอยู่ โดยถึงแม้แบตเตอรี่จะมีความสามารถในการเก็บพลังงานอยู่มาก แต่การจ่ายค่ากระแสก็มีข้อจำกัดเพื่ออายุการใช้งานที่ยืนยาว โดยสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ ผู้ผลิตแนะนำค่ากระแสสูงสุดอยู่ที่ 3C หรือสามเท่าของค่าความจุ เท่ากับ 54 แอมป์ ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงจำเป็นต้องช่วยรับภาระสูงสุดที่เกินค่าจำกัดสำหรับแบตเตอรี่ ซึ่งในที่สุดจะมีผลอัตราการใช้เชื้อเพลิง ในช่วงประจุไฟกลับสู่แบตเตอรี่ ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน โดยผู้ผลิตแนะนำให้ประจุด้วยอัตราเพียง 0.4C หรือ 7 แอมป์เท่านั้น

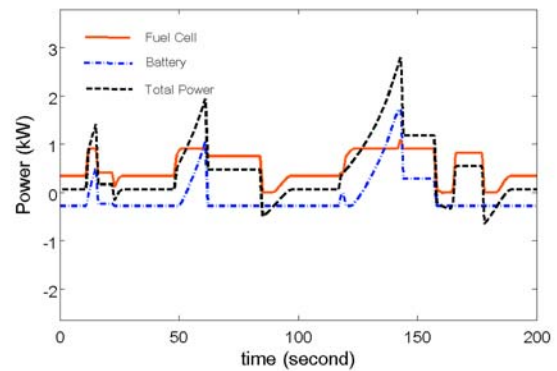
4.2.2 กลยุทธ์ในระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูง

แนวคิดการแบ่งจ่ายพลังงานของระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นมีลักษณะคล้ายกับแนวคิดของระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่ ได้แก่การกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพสูง(ภาระต่ำ)เพื่อจ่ายภาระเฉลี่ย และให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำหน้าที่จ่ายส่วนต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการขับเคลื่อน กับกำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่าย อย่างไรก็ตาม ลักษณะเฉพาะของชุดเก็บประจุความสูงนั้นแตกต่างไปจากแบตเตอรี่ เช่น ชุดเก็บประจุความสูงนั้นไม่มีข้อจำกัดการจ่ายค่ากระแสเหมือนดังแบตเตอรี่ แต่มีข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการเก็บพลังงาน (energy density) ในช่วงประจุไฟกลับในลักษณะ regenerative braking ก็เช่นเดียวกัน ชุดเก็บประจุความสูงก็ไม่มีข้อจำกัดการรับค่ากระแส ทำให้สามารถทำงานกับ regenerative braking ได้อย่างเต็มที่ ตรงที่ชุดเก็บประจุความสูงยังสามารถรับพลังงานได้

4.3 ผลการจำลองระบบ

4.3.1 ระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดแบตเตอรี่

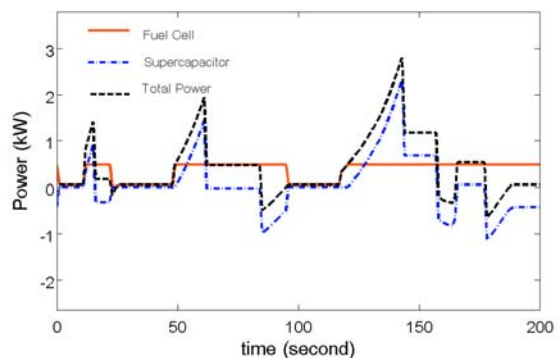
ผลการจำลองระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่ (รูปที่ 15) พบว่า ด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างชุดเซลล์เชื้อเพลิงและชุดแบตเตอรี่ ระบบดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังการขับเคลื่อนได้อย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามจากข้อจำกัดในการจ่ายกระแสของแบตเตอรี่ รวมถึงเพื่อรักษาระดับการประจุเมื่อสิ้นสุดวัฏจักรให้กลับไปเท่ากับค่าตั้งต้น จึงจำเป็นต้องกำหนดการแบ่งจ่ายพลังงานให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ภาระสูงขึ้นจากค่าภาระเฉลี่ยในบางช่วงเวลา ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงต้องทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ข้อจำกัดของกระแสสูงสุดในการประจุพลังงานกลับสู่แบตเตอรี่ทำให้ไม่สามารถนำพลังงานจากการหยุดรถกลับมาใช้ได้ทั้งหมดดังเช่นช่วงเวลาที่ 84 ถึง 90 วินาที และ 175 ถึง 184 วินาที ซึ่งจำเป็นต้องปรับชุดควบคุมมอเตอร์ให้สอดคล้อง และใช้เบรกแบบเสียดทานเข้ามารับภาระแทน



รูปที่ 15 ผลการจำลองการแบ่งจ่ายกำลังขับเคลื่อนของระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่

4.3.2 ระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูง

ผลการจำลองระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงในรูปที่ 16 พบว่าระบบดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังการขับเคลื่อนได้เพียงพอต่อความต้องการเช่นกัน โดยสามารถกำหนดการแบ่งจ่ายพลังงานให้เซลล์เชื้อเพลิงรักษาการทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพที่ดี และชุดเก็บประจุความจุสูงสามารถทำหน้าที่รับภาระในส่วนที่เกินได้ เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงไม่มีข้อจำกัดในด้านกรจ่ายกระแสสูงสุดเหมือนดังแบตเตอรี่ นอกจากนี้การนำพลังงานสูญเสียจากการหยุดกลับมาเก็บก็สามารถทำได้โดยไม่มีข้อจำกัดทางด้านกระแสสูงสุดในการประจุ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของชุดเก็บประจุความจุสูงคือความสามารถในการเก็บพลังงานที่จำกัด ดังนั้นหากระบบมีภาระทางไฟฟ้าที่สูงติดต่อกันเป็นเวลานาน ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงอาจตกลงจนถึงค่าที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ แต่ด้วยวัฏจักรที่ใช้อ้างอิงนี้มีลักษณะที่มีภาระสูงในช่วงสั้น สลับกับภาระต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการขับขึ้นในตัวเมือง ระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงจึงทำงานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 16 ผลการจำลองการแบ่งจ่ายกำลังขับเคลื่อนของระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูง

4.3.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบ

จากผลการจำลองระบบข้างต้น การเปรียบเทียบระหว่างแหล่งพลังงานทุติยภูมิทั้งสองพบว่า ระบบทั้งสองสามารถทำงานจ่ายภาระการขับเคลื่อนได้อย่างเพียงพอ แต่ด้วยลักษณะเฉพาะของชุดตัวเก็บประจุความจุสูงที่สามารถจ่ายกำลังค่าสูงในช่วงเวลาสั้นได้ดีกว่า

แบตเตอรี่ ทำให้ประสิทธิภาพการแปรพลังงานเคมีในก๊าซไฮโดรเจนสู่พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน(ซึ่งเกิดเฉพาะที่ซูดเซลล์เชื้อเพลิง)ของระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับซูดเก็บประจุความจุสูงมีสูงกว่า โดยผลการทดสอบที่จำนวนวัฏจักรมากกว่าหนึ่งโดยมีเงื่อนไขการควบคุมให้ระดับพลังงานของแหล่งจ่ายทุติยภูมิเมื่อสิ้นสุดวัฏจักรกลับมาอยู่ในค่าที่ใกล้เคียงกับขณะเริ่มต้นวัฏจักรมากที่สุด พบว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงของระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับซูดเก็บประจุความจุสูงมีค่าที่ดีกว่าคือ 14.34 standard liter H₂ per km ในขณะที่ระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 19.99 standard liter H₂ per km และเมื่อเปรียบเทียบระยะทางในการขับขี่โดยใช้ถังบรรจุขนาดเล็กที่บรรจุก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณ 500 standard liter แล้วระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับซูดเก็บประจุความจุสูงสามารถขับขี่ได้ระยะทาง 35 กม.ต่อการบรรจุหนึ่งครั้ง ในขณะที่ระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่สามารถขับขี่ได้ระยะทาง 25 กม.

การที่ระบบไฮบริดที่ใช้แบตเตอรี่ทำระยะขับขี่ได้น้อยกว่าต้องการคำอธิบายเพิ่มเติม โดยถึงแม้แบตเตอรี่นั้น โดยเปรียบเทียบจะมีพลังงานที่ถูกเก็บไว้มากกว่าซูดตัวเก็บประจุความจุสูงอยู่มาก แต่ด้วยการออกแบบที่ให้แบตเตอรี่จ่ายเฉพาะภาระสูงสุด ทำให้พลังงานเหล่านั้นไม่ได้ถูกจ่ายออกมาเป็นกำลังขับเคลื่อนทั้งหมด เนื่องจากการทำงานในระบบไฮบริดนี้ต่างจากยานยนต์ไฟฟ้า ที่ออกแบบให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลักแต่เพียงแหล่งเดียว และใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ ทำให้การจ่ายภาระสูงสุดเป็นไปได้โดยไม่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่มากนัก สำหรับระบบไฮบริดในงานนี้ แบตเตอรี่ทำงานอยู่ในช่วงระดับการประจุที่แคบ ระหว่าง 0.495-0.51 ในขณะที่ซูดตัวเก็บประจุความจุสูงสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานที่เก็บไว้ได้เต็มประสิทธิภาพมากกว่า โดยทำงานอยู่ในช่วงระดับพลังงาน 58-100%

นอกเหนือจากข้อพิจารณาเชิงประสิทธิภาพแล้ว การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในรถจักรยานยนต์ที่มีขนาดเล็ก ระบบที่ใช้ซูดตัวเก็บประจุความจุสูงก็มีข้อได้เปรียบในด้านน้ำหนักที่ดีกว่ามาก โดยเงื่อนไขในการออกแบบขั้นต้น ได้กำหนดให้แหล่งพลังงานทุติยภูมิทั้งสองมีปริมาตรรวมที่ใกล้เคียงกัน โดยแบตเตอรี่และซูดตัวเก็บประจุความจุสูงมีค่าอยู่ที่ 6.7 ลิตรและ 5.5 ลิตร ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักแล้ว จะมีค่าอยู่ที่ 20 และ 4 กก. ตามลำดับ

5 บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบเพื่อการพัฒนาแบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด ซึ่งเป็นขั้นแรกที่จะบ่งชี้ถึงรายละเอียดการออกแบบ การประกอบระบบ และการทดสอบในขั้นถัดไปของโครงการวิจัยนี้ โดยได้แสดงให้เห็นว่าการนำซูดเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้รับภาระขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์นั้น ระบบไฮบริดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับแหล่งพลังงานทุติยภูมินั้น บทความนี้ได้พิจารณาถึงแบตเตอรี่และซูดเก็บประจุความจุสูง โดยได้แสดงว่าแหล่งพลังงานทั้งสองสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และแบบจำลองที่เลือกใช้สามารถทำนายการทำงานได้อย่างแม่นยำ และเมื่อทำการเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อน ระหว่างการใช้แหล่งพลังงานทั้งสองโดยมีเงื่อนไขจำกัดที่ปริมาตรให้มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่าทั้งสองระบบ

สามารถจ่ายภาระการขับเคลื่อนได้อย่างเพียงพอ หากแต่เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิง รวมถึงระยะการขับขี่ต่อการเติมเชื้อเพลิงแล้ว ระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับซูดเก็บประจุความจุสูงมีสมรรถนะที่ดีกว่าเป็นอย่างมาก โดยใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าถึง 30% และมีระยะขับขี่ที่มากกว่าถึงกว่า 60% สาเหตุดังกล่าวก็เนื่องจากการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับซูดเก็บประจุความจุสูงนั้น ซูดเก็บประจุความจุสูงไม่มีข้อจำกัดในเชิงกำลังของการจ่ายและประจุกระแสไฟฟ้า ซึ่งต่างกับแบตเตอรี่ที่มีข้อจำกัดในเชิงกำลังของการจ่ายและประจุกระแสไฟฟ้าที่จะไม่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็ว ดังนั้นในการกำหนดการแบ่งจ่ายพลังงานระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับซูดตัวเก็บประจุความจุสูงจึงสามารถกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ต่างกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ต้องทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนั้น น้ำหนักของซูดเก็บประจุความจุสูงยังน้อยกว่าถึงสี่เท่า ผลออกแบบระบบ การศึกษาเปรียบเทียบแหล่งพลังงานทุติยภูมิ พร้อมการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดในที่นี้จึงบ่งชี้ว่าการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก ควรใช้ทำงานร่วมกับซูดตัวเก็บประจุความจุสูงเพื่อสมรรถนะและประสิทธิภาพที่ดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาคีวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์หลักในงานวิจัยนี้ ได้แก่ซูดเซลล์เชื้อเพลิงและซูดรับภาระทางไฟฟ้า

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนบางส่วนจากโครงการพัฒนาสาธิตการใช้ PEMFC ในรถยนต์สามล้อ ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shukla, A.K., Arico, A.S., and Antonucci, V., 2001. An appraisal of electric automobile power. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 5, pp. 137-155
- [2] Specification sheet, Nexa@ power module, <http://www.ballard.com>
- [3] Matthias D'urr , Andrew Cruden, Sinclair Gair, J.R. McDonald Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system Journal of Power Sources 161 (2006) 1400–1411