การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การทดสอบประเมินระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดแบบเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูงสำหรับรถจักรยานยนต์

Experimental Assessment of Fuel Cell / Supercapacitor Hybrid Propulsion for High Performance Scooter.

นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิไกรจิรัฐ นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และ อังคีร์ ศรีภคากร *
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
โทร 02-2186595 โทรสาร 02-2522889 อีเมล์ Paiboon.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กโดยมีชุดเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM พิกัด 1.2 กิโลวัตต์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานปฐมภูมิ การศึกษานี้พิจารณาถึงรูปแบบการจัดวางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบสองแบบ คือ 1) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ และ 2) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการเลือกแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ระหว่างแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูง การทดสอบระบบขับเคลื่อนดำเนินการโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าเพื่อจำลองภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ ผลการทดสอบแสดงถึงความสามารถของระบบขับเคลื่อนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และพบว่าระบบทั้งสองมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกันมาก ในด้านค่าใช้จ่ายนั้นพบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีความคุ้มค่าในระยะยาวมากกว่าแบตเตอรี่ แม้ว่ามีราคาเริ่มต้นที่สูงกว่ามาก นอกจากนั้นชุดเก็บประจุความจุสูงยังมีข้อได้เปรียบที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาใดๆเลย โดยสรุปแล้วชุดเก็บประจุความจุสูงจึงถือเป็นทางเลือกที่ควรให้ความสนใจอย่างหนึ่งสำหรับการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิภายในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

Abstract

This paper presents the development of a hybrid fuel cell propulsion system for scooter where a modular 1.2 kW PEM fuel cell system is employed as a primary energy source. This study explores the optimal configuration of two types of hybrid fuel cell propulsion system including 1) fuel cell-battery hybrid propulsion system and 2) fuel cell-supercapacitor hybrid propulsion system. This work attempts to identify the most suitable secondary energy source for a hybrid fuel cell propulsion system for scooter. The testing was implemented by a programmable electronic load which simulated traction load following a set of selected driving cycles. Hybrid propulsion systems developed are shown to work satisfactorily over the prescribed driving cycles. There is no discernable difference between the fuel consumption of both systems. In term of cost, although supercapacitor has obviously higher initial cost but in the long term, supercapacitor has lower total cost. Supercapacitor also has added benefits in being maintenance. This paper concludes that, compared to the battery, supercapacitor is a better energy storage for a hybrid fuel cell propulsion system in scooters.

1. บทนำ

รถจักรยานยนต์นับว่าเป็นรูปแบบการเดินทางหลักสำหรับเมืองหลวงของหลายประเทศในเอเชีย และการที่รถจักรยานยนต์นั้นมีจำนวนมากในเมืองจึงเป็นต้นกำเนิดของมลพิษในอากาศเป็นปริมาณมาก รวมถึงปัญหามลภาวะทางเสียงที่เกิดจากรถจักยานยนต์ก็เป็นปัญหาที่สำคัญอีกเช่นกัน

จากปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้รถจักรยานยนต์ในเมืองดังกล่าว ได้มีความพยายามผลักดันรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งปราศจากมลพิษออกสู่ตลาด [1] แต่กลับไม่ได้การตอบรับที่ดีนักเนื่องจากการใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทำให้ได้ระยะการขับขี่ที่จำกัด รวมถึงข้อจำกัดของสถานีสำหรับการเติมพลังงานและเวลาในการเติม ดังนั้นแนวทางการพัฒนารถจักรยานยนต์ที่ไร้มลพิษจึงหันมาสู่การพัฒนารถจักรยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิง เช่นเดียวกับที่มีในการพัฒนายานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์ขนาดใหญ่ โดยเซลล์เชื้อเพลิงนั้นถูกมองว่าเป็นรูปแบบการใช้พลังงานที่ปราศจากมลภาวะอย่างสิ้นเชิง

ข้อสังเกตหนึ่งของการพัฒนาของยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันมักมาพร้อมกับการพัฒนาในรูปแบบยานยนต์ไฮบริด [2,3] โดยยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเซลล์เชื้อเพลิงอย่างเดียวนั้นถูกมองว่ามีข้อจำกัดในการทำงานมากจนเกินไป เนื่องจากชุดเซลล์เชื้อเพลิงจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ภาระต่ำกว่าพิกัดสูงสุด รวมถึงการตอบสนองต่อภาระที่จำกัด อย่างไรก็ตามระบบยานยนต์ไฮบริดที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานนั้นมีการออกแบบที่แตกต่างกับยานยนต์ไฮบริดที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นหลักอย่างสิ้นเชิง [4] เนื่องจากลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่างกันกับเครื่องยนต์ และโดยเฉพาะการออกแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์นั้นมีข้อพิจารณาที่แตกต่างกันออกไปจากการออกแบบสำหรับรถยนต์ด้วย ซึ่งเห็นได้จากการกำหนดขนาดของชุดเซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์ เช่น รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงไฮบริดรุ่น FCX จาก Honda และ FCHV จาก Toyota มักกำหนดให้มีพิกัดกำลังเท่ากับกำลังของมอเตอร์ เพื่อให้สามารถรองรับการขับขี่ได้ทุกรูปแบบ [5] โดยไม่ได้ให้ความสำคัญกับขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิมากนัก เพราะเป้าหมายของการออกแบบรถยนต์ที่ไม่ต้องคำนึงถึงด้านราคามากนัก รวมถึงในรถยนต์นั้นมีพื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ได้อย่างเพียงพอ แต่ในการออกแบบสำหรับรถจักรยานยนต์นั้นราคาและพื้นที่ในการติดตั้งถือเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ดังนั้นการกำหนดขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงจึงต้องถูกกำหนดที่กำลังเพื่อการขับขี่ที่ความเร็วคงที่ (Cruising power) แล้วกำหนดขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิให้สามารถรองรับภาระในส่วนเกินได้ นอกจากนั้นจากการคำนวณค่ากำลังขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์และรถยนต์ในวิทยานิพนธ์ของนาถณรงค์ [6] ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถจักรยานยนต์ต้องใช้พลังงานในการขับขี่มากกว่ารถยนต์เมื่อคิดต่อหน่วยมวลและระยะทางเท่ากันซึ่งหมายถึงการออกแบบระบบสำหรับรถจักรยานยนต์จะต้องรองรับพลังงานต่อมวลที่มากกว่า

แม้ว่าข้อพิจารณาของการออกแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์จะแตกต่างกันกับการออกแบบสำหรับรถยนต์ แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยที่ศึกษาโดยจำเพาะเจาะจงถึงระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ยังมีอยู่อย่างจำกัด [7,8,9] และยังคงมีคำถามอยู่ในหลายประเด็น เช่น สัดส่วนการแจกแจงพลังงานในระบบไฮบริด การกำหนดขนาดโดยพิจารณาขนาดและน้ำหนัก การพิจารณาด้านระยะการขับขี่และการประหยัดพลังงาน ผลของการนำพลังงานจากการหยุดรถกลับมาใช้สำหรับการจราจรในเมือง และ การพิจารณาเปรียบเทียบข้อได้เปรียบระหว่างแบตเตอรี่และชุดเก็บประจุความจุสูงอย่างสมเหตุผล

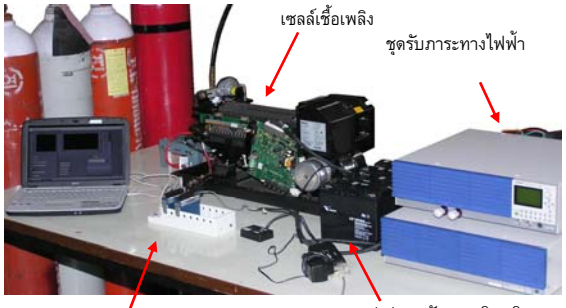
บทความนี้เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนตขนาดเล็ก โดยเป็นการศึกษาต่อเนื่องจาก นาถณรงค์ และคณะ [10] ที่ได้วิเคราะห์ออกแบบระบบและกำหนดขนาดส่วนประกอบเบื้องต้นไปแล้ว ในบทความนี้ได้นำกรอบสมรรถนะและขนาดของส่วนประกอบต่างๆที่ได้กำหนดไว้แล้วมาใช้ โดยศึกษาถึงรูปแบบการจัดวางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบสองชนิดคือ 1) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ และ 2) ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor, Ultracapacitor) บทความนี้จะได้แสดงถึงการติดตั้งและทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของระบบทั้งสองแบบ โดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้า (Programmable Electronic Load) ในการจำลองภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบในด้านสมรรถนะ และ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง นอกจากนั้นได้ศึกษาเปรียบเทียบถึงข้อพิจารณาที่เกี่ยวข้องต่างๆ เช่น ราคา อายุการใช้งานและการบำรุงรักษา โดยมีเป้าหมายสำคัญคือการประเมินว่าแหล่งจ่ายพลังงานชนิดใดระหว่างชุดเก็บประจุความจุสูงหรือแบตเตอรี่ จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

2. ชุดทดลองระบบขับเคลื่อน

หัวข้อนี้แนะนำถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบขับเคลื่อน รวมถึงลักษณะเฉพาะของแต่ละอุปกรณ์ และข้อพิจารณาในการเลือกใช้

2.1 ชุดรับภาระทางไฟฟ้า

การทดสอบระบบขับเคลื่อนนั้นจะทดสอบโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้า เพื่อแทนที่ชุดควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์ดังรูปที่ 1 ซึ่งชุดรับภาระทางไฟฟ้านี้สามารถจำลองภาระทางไฟฟ้าของการขับขี่ของรถจักรยานยนต์ ชุดรับภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ในงานนี้เป็นรุ่น PLZ 1004 W จาก KIKUSUI พิกัด 1 กิโลวัตต์ และทำงานร่วมกับชุดเพิ่มภาระทางไฟฟ้า (Load booster) รุ่น PLZ 2004 WB พิกัด 2 กิโลวัตต์ สองชุด ช่วยให้พิกัดรวมอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์



รูปที่ 1 ชุดทดลองระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด

2.2 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton exchange membrane รุ่น NEXA จาก Ballard ขนาด 1.2 กิโลวัตต์ เซลล์เชื้อเพลิงนี้มาพร้อมชุดระบบย่อยสำหรับการทำงาน มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา (13 กิโลกรัม) และอุณหภูมิการทำงานต่ำ (40^{o}C) การระบายความร้อนใช้อากาศ และใช้ไอน้ำจากปฏิกิริยากลับมาสร้างความชื้นให้อากาศที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่ต้องใช้น้ำจากแหล่งภายนอก ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวประกอบกับการประเมินความเป็นไป

ได้ในด้านพลังงานดังแสดงใน นาถณรงค์ และคณะ [10] ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าเหมาะสมกับการใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่ระบบขับเคลื่อนในรถจักรยานยนต์

2.3 แบตเตอรี่

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ และนำแบตเตอรี่มาใช้เป็นแหล่งพลังงานทุติยภูมิเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเสริมให้กับระบบขับเคลื่อนในขณะที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้ามากเท่านั้น นอกจากนั้นในการออกแบบสำหรับรถจักรยานยนต์นั้นต้องพิจารณาในด้านราคาเป็นสำคัญเช่นกัน ดังนั้นแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงนั้น จะไม่มุ่งเน้นที่แบตเตอรี่ที่มีสมรรถนะสูงมากนัก แต่จะเน้นที่รูปแบบที่หาได้ง่ายในท้องตลาดและมีราคาไม่แพง ดังนั้นจึงเลือกใช้แบตเตอรี่แบบ VRLA (Valve regulated lead acid) ขนาด 18 แอมแปร์-ชั่วโมง จำนวนสี่ลูก

2.4 ชุดเก็บประจุความจุสูง

จากการศึกษาของนาถณรงค์ และคณะ [10] ได้กำหนดขนาดของชุดเก็บประจุความจุสูงไว้ที่ขนาด 1500 ฟารัด จำนวน 14 หน่วย ซึ่งเป็นการกำหนดขนาดด้วยข้อพิจารณาด้านพลังงาน สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาเพิ่มเติมในด้านแรงดันไฟฟ้าใช้งานของชุดเก็บประจุความจุสูงซึ่งจะมีผลต่อการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ รวมทั้งได้พิจารณาขนาดและน้ำหนักสำหรับการเปรียบเทียบอย่างเหมาะสมกับระบบไฮบริดที่ใช้แบตเตอรี่ ในงานวิจัยนี้ใช้ผลิตภัณฑ์ของ Maxwell รุ่น BMOD0165E048 ซึ่งเป็นชุดเก็บประจุความจุสูงแบบประกอบสำเร็จซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยขนาด 3000 ฟารัด จำนวน 18 หน่วย พร้อมวงจรปรับสมดุลแรงดันไฟฟ้า

2.5 ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC Converter) นับได้ว่ามีความสำคัญมาก เพราะการกำหนดกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดนั้นจะต้องกำหนดผ่านทางชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้ โดยในงานนี้เลือกใช้ รุ่น CH63120F-SU จาก Zahn Electronics, Inc พิกัดกำลัง 3.9 กิโลวัตต์ การทำงานแบบเพิ่มแรงดัน (Step up) แบบสองทาง (Bidirectional) สามารถรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าได้ในช่วง 12 ถึง 61 โวลต์ และรับกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้สูงสุด 120 แอมแปร์ สามารถปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ตามต้องการ แต่ต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้า 2 โวลต์ และอยู่ในช่วง 14 ถึง 63 โวลต์ และสามารถปรับตั้งค่าจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าได้ตามต้องการ

3. วิธีการทดลอง

การทดสอบนั้นดำเนินการโดยใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้าเพื่อจำลองภาระการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับทดสอบ แทนการนำระบบขับเคลื่อนมาทดสอบกับรถจักรยานยนต์จริง เนื่องจากพิจารณาว่า การใช้ชุดรับภาระทางไฟฟ้านั้น นอกจากช่วยให้การทดสอบระบบขับเคลื่อนรวมถึงการแก้ไขการปรับตั้งเป็นไปได้โดยง่ายแล้ว ยังสามารถควบคุมให้การทดสอบเป็นไปตามวัฏจักรขับทดสอบที่ต้องการได้อย่างดี และช่วยให้การทดสอบในแต่ละครั้งนั้นมีลักษณะที่ตรงกันได้ นอกจากนั้นยังช่วยให้การทดสอบเป็นไปได้โดยปลอดภัย อย่างไรก็ตามการนำชุดรับภาระทางไฟฟ้ามาใช้นั้นยังคงมีข้อจำกัดที่ว่าไม่สามารถจำลองสถานการณ์ที่มีการนำพลังงานจากการหยุดรถกลับมาเก็บได้ (Regenerative Braking) แต่เมื่อพิจารณาผลของค่าพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวในกรณีของรถจักรยานยนต์ พบว่ามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ระบบต้องจ่าย [6,7]

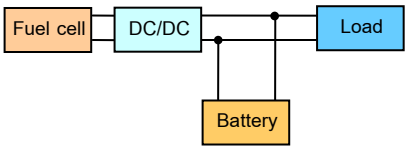
เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่สามารถสรุปผลได้อย่างครอบคลุมการขับขี่ในลักษณะต่างๆมากที่สุด ในงานนี้จึงเลือกใช้วัฏจักรขับทดสอบสามรูปแบบได้แก่ 1) วัฏจักรขับทดสอบ ECE-15 ซึ่งเป็นวัฏจักรขับทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขี่ในเมืองโดยอ้างอิงจากการขับขี่ในเมืองของประเทศในยุโรป ซึ่งมีลักษณะที่ใช้ความเร็วค่อนข้างสูง (เมื่อเทียบกับวัฏจักรขับทดสอบในเมืองอื่นๆ) แต่มีการเร่งที่ต่ำและไม่บ่อยครั้ง และมีช่วงจอดหยุดนิ่งนาน 2) วัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่ดัดแปลงมาจากวัฏจักรขับทดสอบแบบ FTP-75 โดยนำมาใช้เฉพาะส่วน Transient เนื่องจากมีความเร็วที่ไม่สูงเกินไป รูปแบบเป็นวัฏจักรขับทดสอบที่มีการเร่งความเร็วสูงและบ่อยครั้งสลับกับการจอดหยุดนิ่งเพียงช่วงเวลาสั้นๆ และ 3) วัฏจักรขับทดสอบ NYCC เป็นวัฏจักรขับทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขี่ในเมืองอีกเช่นกัน ซึ่งอ้างอิงจากการขับขี่ของยานยนต์ขนาดเล็กในเมืองนิวยอร์ก รูปแบบนี้มีลักษณะที่ใช้ความเร็วในการขับขี่ต่ำ แต่มีการเร่งความเร็วที่สูงมากและบ่อยครั้งและมีช่วงการจอดหยุดนิ่งที่ยาวนาน

4. การเลือกรูปแบบการจัดวางระบบขับเคลื่อน

การติดตั้งและการปรับตั้งกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานระบบขับเคลื่อนสามารถทำได้ในหลายลักษณะ ซึ่งได้สรุปรูปแบบต่างๆ ที่ได้ทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

จากการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีช่วงแรงดันไฟฟ้าทำงานกว้าง ดังนั้นการติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ จึงพิจารณาใช้การติดตั้งโดยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานภายใต้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้นดังรูปที่ 2 ด้วยการติดตั้งในรูปแบบนี้สามารถกำหนดกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานได้สองวิธีดังนี้



รูปที่ 2 การจัดวางระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่

4.1.1 กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled

กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load leveled เป็นรูปแบบที่กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังแบบคงที่ในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และให้แบตเตอรี่จ่ายกำลังในส่วนที่เกินตามภาระ

การปรับตั้งนั้นทำได้โดยกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งจะเป็นการชาร์จแบตเตอรี่ตลอดเวลาที่ไม่มีภาระหรือมีภาระต่ำ และต้องปรับค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไว้ในจุดที่เซลล์เชื้อเพลิงให้ประสิทธิภาพสูงสุด

ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถจ่ายกำลังตามภาระได้อย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามการที่กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังในจุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานตามวัฏจักรขับทดสอบนั้นไม่เพียงพอแก่ค่าภาระเฉลี่ย ดังนั้นแบตเตอรี่จึงจ่ายพลังงานออกมามากกว่ารับกลับคืน ซึ่งจะส่งผลให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่มีแนวโน้มที่ลดลง โดยจะลดลงจนไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ในที่สุด

4.1.2 กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following

กลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานแบบ Load Following เป็นรูปแบบที่กำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานเต็มพิกัดกำลังเพื่อจ่ายกำลังตามภาระและให้แบตเตอรี่ช่วยจ่ายกำลังในส่วนที่เกินกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายได้

การปรับตั้งนั้นทำได้โดยกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่ และปรับค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไว้ที่ค่าพิกัดสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิง

ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถจ่ายกำลังตามภาระได้อย่างเพียงพอ โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่จ่ายกำลังตามภาระก่อนตราบเท่าที่ยังอยู่ในพิกัดซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจ่ายกำลังแบบไม่คงที่ของเซลล์เชื้อเพลิง และเมื่อค่าภาระมีสูงเกินกว่าพิกัดกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่จึงช่วยจ่ายกำลังเพื่อให้เพียงพอแก่ภาระ อย่างไรก็ตามการที่ให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานแบบไม่คงที่นั้นจะส่งผลให้ระบบควบคุมภายในเซลล์เชื้อเพลิงต้องทำงานหนัก ซึ่งจะส่งผลต่ออายุการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงได้ นอกจากนั้นรูปแบบนี้ไม่มีแนวคิดในการชาร์จคืนแก่แบตเตอรี่ จึงส่งผลให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่ลดลงตลอดเวลาจนไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ในที่สุด

4.1.3 สรุปรูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่

การปรับตั้งกลยุทธ์การแบ่งจ่ายพลังงานนั้นพิจารณาใช้ปรับตั้งโดยใช้แนวคิดแบบ Load leveled เนื่องจากมีแนวคิดที่มีการชาร์จคืนให้แก่แบตเตอรี่ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนั้นในการปรับตั้งการจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะต้องคำนึงถึงค่าภาระเฉลี่ย ซึ่งจะต้องกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังสูงกว่าค่าภาระเฉลี่ยนี้เพื่อให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่มีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะต้องไม่ปรับตั้งให้มีค่าสูงเกินไปเพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง นอกจากนั้นการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกำลังไฟฟ้าสูงนั้นจะส่งผลต่ออายุของแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดให้มีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลงจากค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่แบตเตอรี่มากเกินไป และเพื่อให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพทั้งการจ่ายและรับพลังงานไฟฟ้าที่ดี จึงควรกำหนดให้แบตเตอรี่ทำงานในช่วงระดับการประจุระหว่าง 50 % ถึง 70 % [11]

4.2 ระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและชุดเก็บประจุความจุสูง

ในเบื้องต้นได้พิจารณาการติดตั้งระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดแบบทำงานร่วมกับชุดเก็บประจุความจุสูง ไว้สามแนวทางดังรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามด้วยเงื่อนไขบังคับในการออกแบบระบบสำหรับรถจักรยานยนต์ ที่มุ่งเน้นการใช้อุปกรณ์ให้น้อยชิ้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งมาที่การติดตั้งโดยใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพียงตัวเดียวดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) มากกว่าใช้การติดตั้งโดยใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสองตัวดังรูปที่ 3 (ค) แม้ว่าการติดตั้งโดยใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสองตัวนั้นจะให้การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าได้คงที่และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ดีกว่า

4.2.1 การติดตั้งโดยเซลล์เชื้อเพลิงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

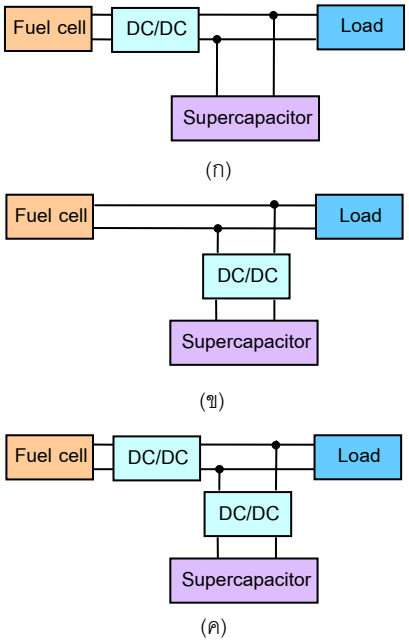
การติดตั้งนั้นจะต้องปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ตรงกับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของชุดเก็บประจุความจุสูง ซึ่งจะเป็นการชาร์จให้กับชุดเก็บประจุความจุสูงตลอดเวลาที่ไม่มีภาระหรือมีภาระต่ำ นอกจากนั้นต้องปรับตั้งค่าการจำกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งก็คือการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเอง

จากการทดสอบพบว่าหากกำหนดค่ากำลังจากเซลล์เชื้อเพลิงไว้สูงเพียงพอแก่ค่าภาระเฉลี่ยแล้ว ระบบจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอและสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องรวมถึงแรงดันบัสมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบๆ

4.2.2 การติดตั้งโดยชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การติดตั้งในรูปแบบนี้จะไม่มีการปรับตั้งการจำกัดกระแสที่ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเป็นกระแสไฟฟ้าจากชุดเก็บประจุความจุสูงซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงมากได้ จึงไม่มีความจำเป็นในการจำกัดกระแสในจุดนี้ แต่จุดที่มีความจำเป็นในการจำกัดกระแสไฟฟ้านั้นคือกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการติดตั้งในรูปแบบที่สองนี้จะจำกัดกระแสโดยการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้กระแสไฟฟ้าตามต้องการ

จากการทดสอบพบว่าหากปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอแก่ค่าภาระเฉลี่ยแล้วจะส่งผลให้ระดับพลังงานของชุดเก็บประจุลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ระบบไม่สามารถดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง และถึงแม้ว่าจะปรับตั้งให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกำลังไฟฟ้าเพียงพอแก่ค่าภาระเฉลี่ยซึ่งช่วยให้ระบบดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณาช่วงแรงดันบัส พบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่กว้างมาก



รูปที่ 3 แนวทางการติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและชุดเก็บประจุความจุสูง

4.2.3 สรุปรูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูง

การติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและชุดเก็บประจุความจุสูง พิจารณาว่าการติดตั้งโดยกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานภายใต้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นรูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการติดตั้งโดยให้ชุดเก็บประจุความจุสูงทำงานภายใต้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่สามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องและมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดันกว้าง และในส่วนของการติดตั้งโดยใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้าสองตัวนั้นมองว่าไม่สอดคล้องกับการออกแบบระบบสำหรับรถจักรยานยนต์ซึ่งมุ่งเน้นที่มีการใช้อุปกรณ์ให้น้อยที่สุดเพื่อพื้นที่การติดตั้ง อย่างไรก็ตามในการปรับตั้งการจำกัดกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นต้องคำนึงถึงค่าภาระเฉลี่ยเช่นกันเพื่อให้ระบบสามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง

ด้วยการออกแบบติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดทั้งสองแบบ สามารถนำรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของทั้งสองแบบมาพิจารณาเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบดังหัวข้อถัดไป

5. การเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อน

เป้าหมายสำคัญที่สุดของงานวิจัยนี้คือการวิเคราะห์และหาคำตอบว่าแหล่งจ่ายพลังงานชนิดใดระหว่างแบตเตอรี่หรือชุดเก็บประจุความจุสูง จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ เพื่อตอบคำถามดังกล่าวในงานนี้จะพิจารณาถึงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อระยะทางในการขับขี่ ความสามารถในการรับภาระในรูปแบบต่างๆ และค่าแรงดันไฟฟ้าบัสของระบบซึ่งเป็นค่าที่ส่งผลต่อการทำงานร่วมกันกับชุดควบคุมมอเตอร์ รวมไปถึงประเด็นต่างๆที่เกี่ยวข้องได้แก่ ด้านราคา อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษา

ในการติดตั้งระบบขับเคลื่อนทั้งสองชนิดเพื่อทดสอบเปรียบเทียบนั้นได้ใช้รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละชนิดดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.1.3 และ 4.2.3 ซึ่งใช้ค่าการจำกัดกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ประมาณ 750 วัตต์ กับระบบทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นค่าที่พิจารณาจากภาระเฉลี่ยตามวัฏจักรขับทดสอบและยังคงเป็นจุดทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูง

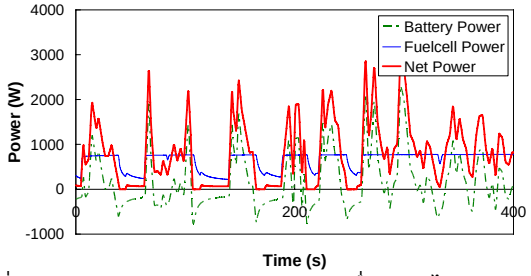
สำหรับระบบที่ใช้แบตเตอรี่นั้น โดยมากหลังจากที่ได้ทดสอบแล้วระดับการประจุของแบตเตอรี่จะมีค่าที่เปลี่ยนไปจากค่าเริ่มต้น แม้ว่าในการปรับตั้งระบบจะมีความพยายามให้แบตเตอรี่มีระดับการประจุเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดแล้วก็ตาม ดังนั้นในการประเมินปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับระบบที่ใช้แบตเตอรี่จึงต้องมีการปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากที่วัดได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้การปรับแก้ตามแนวคิดบางส่วนของ Ding และคณะ [12] แต่ได้ใช้การประประเมินระดับการประจุโดยการวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งต้องวัดหลังจากที่แบตเตอรี่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อความแม่นยำ แทนการใช้ค่าอินทิกรัลของกระแสไฟฟ้า แต่สำหรับระบบที่ใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงนั้น การปรับแก้ดังกล่าวนี้ไม่ได้มีความสำคัญมากนักเพราะว่าโดยมากแล้วระดับพลังงานของชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้น ดังนั้นจึงไม่มีการปรับแก้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในระบบที่ใช้ชุดเก็บประจุความจุสูง

5.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนสองชนิด

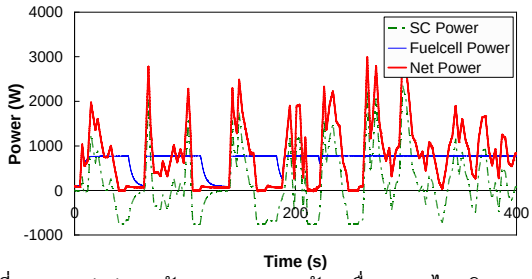
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบขับเคลื่อนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอ และแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิทั้งสองชนิดสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าตามภาระส่วนที่เกินจากเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างดีดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ซึ่งแสดงผลการแบ่งจ่ายพลังงานตามตามวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75 อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับวัฏจักรขับทดสอบอีกสองแบบ (ECE-15 และ NYCC) ซึ่งระบบสามารถการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวัฏจักรขับทดสอบดังกล่าวได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอเช่นกัน แต่ด้วยข้อจำกัดของพื้นที่จึงละการแสดงผลดังกล่าวไว้ ณ ที่นี้

ส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาต่อมาคือปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของระบบขับเคลื่อนทั้งสองชนิด ซึ่งจากการทดสอบโดยวัฏจักรขับทดสอบทั้งสามแบบ พบว่าระบบทั้งสองมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกันมากดังตารางที่ 1 ซึ่งมีความแตกต่างกันเพียง 1.9 % 0.7% และ 4.7%

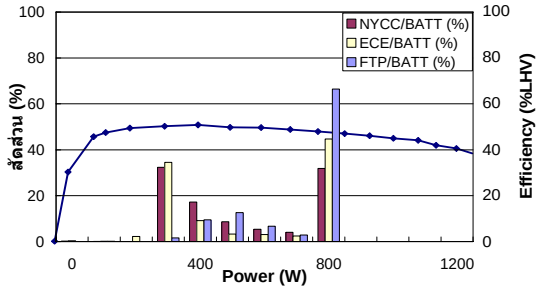
ตามลำดับ ซึ่งผลทดสอบดังกล่าวนี้อธิบายได้โดยพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของการจ่ายกำลังไฟฟ้าดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 กล่าวคือแม้ระบบทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวของการจ่ายกำลังจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่างกัน แต่ยังคงมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงที่ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเห็นได้ว่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของเซลล์เชื้อเพลิงจากระบบทั้งสองชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และเมื่อพิจารณาการปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงซึ่งคิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับการประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งการที่กำหนดให้แบตเตอรี่ทำงานช่วงระดับการประจุดังหัวข้อที่ 4.1.3 นั้นเป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพที่ดี ดังนั้นเมื่อได้ปรับแก้ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแล้วจึงให้ผลที่ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ชุดเก็บประจุความจุสูงเมื่อทำงานที่ค่าภาระของระบบเดียวกัน (วัฏจักรขับทดสอบเดียวกัน)



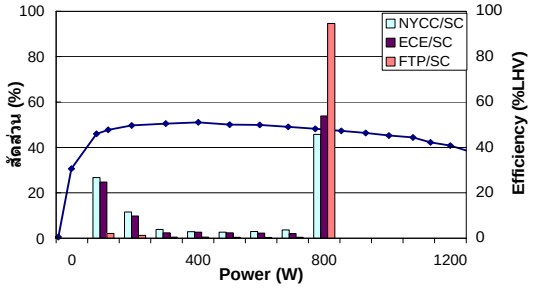
รูปที่ 4 การแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับแบตเตอรี่ตามวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75



รูปที่ 5 การแบ่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบไฮบริดระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงกับชุดเก็บประจุความจุสูงตามวัฏจักรขับทดสอบ Modified FTP-75



รูปที่ 6 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานกับแบตเตอรี่



รูปที่ 7 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานกับชุดเก็บประจุความจุสูง

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์เชื้อเพลิงโดยคิดจากค่าความร้อนต่ำของก๊าซไฮโดรเจน

	Fuel Cons.(Standard Liters per km)		Average Fuel cell efficiency (%LHV)	
	Supercapacitor	Battery	Supercapacitor	Battery
ECE-15	19.63	20.01	47.12	47.69
mo FTP-75	20.86	20.70	47.11	47.46
NYCC	29.17	30.62	47.48	47.38

ในส่วนของการพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าบัสของระบบซึ่งเป็นค่าที่ส่งผลต่อการทำงานร่วมกันกับชุดควบคุมมอเตอร์ พบว่าระบบที่ใช้ชุดเก็บประจุความจุสูง มีการแปรเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้าของระบบน้อยกว่าระบบที่ใช้แบตเตอรี่อย่างชัดเจนเมื่อทำงานด้วยวัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังเฉลี่ยต่ำ เช่น ECE-15 และ NYCC ดังตารางที่ 2 ในขณะที่เมื่อทำงานด้วยวัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังเฉลี่ยสูงอย่าง modified FTP-75 กลับพบว่าระบบที่ใช้ชุดเก็บประจุความจุสูง มีการแปรเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้าบัสของระบบมาก เนื่องจากชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นมีค่าความต้านทานภายในต่ำกว่าแบตเตอรี่มาก แต่แรงดันไฟฟ้าของชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นแปรตามระดับพลังงาน ดังนั้นวัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำ จึงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับชุดเก็บประจุความจุสูงน้อย แต่วัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงนั้น จึงกลับให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับชุดเก็บประจุความจุสูงมาก แต่สำหรับแบตเตอรี่นั้นมีค่าความต้านทานภายในสูง เมื่อทำงานกับวัฏจักรขับทดสอบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมากจึงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ามาก

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าบัสของระบบโดยสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

	% Vbusmin / Vbusmax	
	Supercapacitor	Battery
ECE-15	93.1	83.8
mo FTP-75	78.1	77.7
NYCC	91.0	72.3

5.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนัก

การพิจารณาในด้านค่าใช้จ่ายนั้นนอกจากต้องคำนึงในด้านราคาเริ่มต้นแล้วสิ่งที่ต้องพิจารณาไปพร้อมกันคืออายุการใช้งานเนื่องจากต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่หมดอายุด้วย

การพิจารณาเปรียบเทียบในด้านอายุการใช้งานในงานวิจัยนี้ใช้การพิจารณาเปรียบเทียบโดยค่าพลังงานที่นำมาใช้ได้ตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสองชนิดมีความสามารถในการเก็บพลังงานที่ต่างกันมาก ซึ่งหากใช้การเปรียบเทียบโดยใช้จำนวนรอบการใช้งานที่ผู้ผลิตแนะนำนั้นจะทำให้เปรียบเทียบได้ไม่ชัดเจน รวมถึงจำนวนรอบการใช้งานที่ผู้ผลิตกำหนดก็มีนิยามของการหมดอายุต่างกัน โดยตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบในด้านราคา อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนัก ซึ่งพบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมีความคุ้มค่าในด้านราคาในระยะยาวกว่าแบตเตอรี่มาก แม้ว่ามีราคาเริ่มต้นที่สูงกว่ามาก ในด้านขนาดและน้ำหนักนั้นจากการออกแบบที่พิจารณาเพื่อความเป็นไปได้ในการติดตั้งในรถจักรยานยนต์รวมถึงเพื่อเปรียบเทียบระบบสองชนิดอย่างสมเหตุผล พบว่าชุดเก็บประจุความจุสูงและแบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีปริมาตรที่ใกล้เคียงกัน แต่แบตเตอรี่ยังคงมีน้ำหนักที่มากกว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมาก

ในส่วนของการบำรุงรักษาตลอดการใช้งานนั้น แบตเตอรี่จำเป็นต้องมีการนำออกมาชาร์จโดยอุปกรณ์ภายนอกเป็นครั้งคราวเพื่อให้แบตเตอรี่แต่ละหน่วยย่อยในระบบมีระดับการประจุที่เท่าเทียมกัน (Equalization) รวมถึงเพื่อลดการเสื่อมอายุจากการเกิดซัลเฟตเมื่อต้องทำงานแบบ High rate partial state of charge [13] เป็นเวลานาน ในขณะที่ชุดเก็บประจุความจุสูงนั้นมีข้อได้เปรียบที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาใดๆเลย

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบราคา อายุการใช้งาน ขนาดและน้ำหนัก

	Supercapacitor	Battery
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	14.2	23.6
ปริมาตร (ลิตร)	12.6	9.3
ราคา (บาท)[ก]	17000 [ข]	4200[ค]
อายุการใช้งาน (วัฏจักร)	1×10^6	500
พลังงานตลอดอายุการใช้งาน (วัตต์-ชั่วโมง)	3.49×10^7	1.73×10^5
พลังงานตลอดอายุการใช้งานต่อราคา (วัตต์-ชั่วโมง ต่อ บาท)	**2005**	**41**

หมายเหตุ

ก. อัตราแลกเปลี่ยน 32.2 บาทต่อหนึ่ง U.S. Dollar (พฤษภาคม 2551)

ข. อ้างอิงราคาจากผู้ผลิต โดยการประมาณราคาเมื่อมีการผลิตในปริมาณมาก

ค. อ้างอิงจาก Husain [14] ซึ่งสอดคล้องกับราคาตลาดปัจจุบัน(2551)

6. สรุปผลการเปรียบเทียบ

จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบในด้านประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงของระบบขับเคลื่อนทั้งสองแบบในหัวข้อที่ 5.1 พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนสำหรับการบ่งชี้ว่าแหล่งจ่ายพลังงานชนิดใดระหว่างสองชนิดจะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิให้แก่ระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด แต่จากการพิจารณาประเด็นที่เกี่ยวของในด้านต่างๆ นอกเหนือจากการทดสอบเปรียบเทียบแล้ว เช่น ด้านราคา อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษาเห็นได้ว่า แม้แบตเตอรี่จะมีราคาเริ่มต้นที่ต่ำกว่าชุดเก็บประจุความจุสูงมาก แต่จากการที่ชุดเก็บประจุความจุสูงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่มากซึ่งหากพิจารณาในระยะยาวแล้วชุดเก็บประจุความจุสูงจะมีความคุ้มค่าด้านราคามากกว่า รวมถึงมีข้อได้เปรียบที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาตลอดการใช้งานเลย โดยสรุปแล้วชุดเก็บประจุความจุสูงจึงถือเป็นทางเลือกที่ควรให้ความสนใจอย่างหนึ่งสำหรับการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิภายในระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์หลักในงานวิจัยนี้ ได้แก่ชุดเซลล์เชื้อเพลิงและชุดรับภาระทางไฟฟ้า

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนบางส่วนในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนบางส่วนจากโครงการพัฒนาสาธิตการใช้ PEMFC ในรถยนต์สามล้อ ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Chunto Tso and Shih-Yun Chang, "A viable niche market—fuel cell scooters in Taiwan" International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 757–762
2. Gao, W., “Performance Comparison of a Fuel Cell-Battery Hybrid Powertrain and a Fuel Cell-Ultracapacitor Hybrid Powertrain” IEEE Trans. Veh.Tech. Vol. 54, No. 3, May 2005, pp.846-855
3. J. P. Zheng, T. R. Jow, and M. S. Ding, “Hybrid power sources for pulsed current applications” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 37, no. 1, pp. 288–291, Jan. 2001.
4. Rajesh K. Ahluwalia and X. Wang ”Direct hydrogen fuel cell systems for hybrid vehicles” Journal of Power Sources 139 (2005) 152–164
5. G. Pede et.al., “FC vehicle hybridisation: an affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train” Journal of Power Sources 125 (2004) 280–291
6. นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิไกรจิรัฐ, การพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์, วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2551
7. Corbo, P., et.al., “Experimental assessment of energy-management strategies in fuel-cell propulsion systems”

Journal of Power Sources 157 (2006) 799–808

8. Bruce Lin, “Conceptual design and modeling of a fuel cell scooter for urban Asia” Journal of Power Sources 86 (2000) 202-213
9. Arne LaVen, “Development of a Prototype fuel cell powered motor scooter” Master Thesis, University of Nevada,1999
10. นาถณรงค์ ลิ้มวุฒิไกรจิรัฐ นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และไพบูลย์ ศรีภคากร, การวิเคราะห์และออกแบบระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก, การสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, พัทยา, ชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550
11. Donald W. Corson, “High Power Battery systems for hybrid vehicles” Journal of Power Sources 105 (2002) 110-113
12. Yi Ding et.al., “Hydrogen Fuel Cell Vehicle Fuel Economy Measurements and Calculation” SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2004-01-1339
13. Patrick T. Moseley, “High rate partial-state-of-charge operation of VRLA batteries ” Journal of Power Sources 127 (2004) 27-32
14. Iqbal Husain. Electric and hybrid vehicles. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431 : CRC Press LCC, 2003.