ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247628

MRG5180348 ผศ.ดร. ปฏิพัทธ์ ทวนทอง

สกว
TRF

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์ และแบตเตอร์รี่

Hybrid DC Distributed System Supplied by Fuel Cell/Solar Cell/Battery

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง และคณะ

สิงหาคม 2553

b00252213

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247628

สัญญาเลขที่ MRG5180348

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และแบตเตอร์รี่

Hybrid DC Distributed System Supplied by Fuel Cell/Solar Cell/Battery

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1). ผศ.ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2). รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5180348

ชื่อโครงการ : ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และแบตเตอร์รี่

ชื่อนักวิจัย :

1). ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง[1,2]

2). รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก[3]

[1]ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2]ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[3]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail Address : phtt@kmutnb.ac.th

247628

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

โครงการวิจัยนี้นำเสนอโรงไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน จ่ายไฟโดยเซลล์แสงอาทิตย์และเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานจ่ายไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหลัก เซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายช่วยจ่ายไฟทั้งในสภาวะอยู่ตัวในกรณีที่ไฟไม่พอจากเซลล์แสงอาทิตย์และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสำรองช่วยจ่ายไฟทั้งสภาวะไดนามิกส์และสภาวะอยู่ตัวในกรณีที่ไฟไม่พอจากเซลล์แสงอาทิตย์และเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานกำลังสูงและการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปลงไฟกำลังสูง ตัวแปลงไฟแบบทบแรงดันที่ขนานกัน 4 ชุดถูกออกแบบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ตัวแปลงไฟแบบทบแรงดันที่ขนานกัน 2 ชุดถูกออกแบบสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์และตัวแปลงไฟแบบสองทิศทางที่ขนานกัน 4 ชุดถูกออกแบบสำหรับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกนำเสนอสำหรับการควบคุมโรงไฟฟ้านี้ โดยทฤษฎีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นของวิธีการแบบแบนเรียบ ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายขึ้นสำหรับปัญหาสำคัญด้านไดนามิกส์ ด้านเสถียรภาพ ด้าน

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบของโรงไฟฟ้า ด้วยวิธีการควบคุมแบบใหม่นี้ทำให้โครงงานวิจัยนี้นำเสนอผลงานต้นแบบ

โรงไฟฟ้าขนาดเล็กต้นแบบได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นจริง ประกอบไปด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิง (1.2 kW) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (0.8 kW) และโมดูลซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (100 F) ผลการทดลองพิสูจน์ยืนยันวิธีการควบคุมที่นำเสนอขณะมีโหลดหลายๆ แบบ

ผลงานวิจัยของโครงการนี้ ได้สรุปเป็นบทความวิจัยและบทความวิชาการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มี impact factor สูง แล้วจำนวน 9 เรื่อง (6 เรื่องตีพิมพ์ใน IEEE Transactions กับ IEEE Magazine และ 3 เรื่องใน Elsevier Journals) และนำเสนอในที่ประชุมระดับนานาชาติจำนวน 9 เรื่อง ด้านการพัฒนาศักยภาพบุคลากรการวิจัยนั้น ประกอบด้วยนักวิจัยที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทจำนวน 3 คน

คำหลัก : Converters, fuel cells, hybrid, nonlinear control, photovoltaic, supercapacitor.

Abstract

Project Code : MRG5180348

Project Title : Hybrid DC Distributed System Supplied by Fuel Cell/Solar Cell/Battery

Investigator :

1). Asst.Prof.Dr.Phatiphat Thounthong[1,2]

2). Assoc.Prof.Dr.Viboon Chunkag[3]

[1]Renewable Energy Research Centre
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[2]Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[3]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

E-mail Address : phtt@kmutnb.ac.th

247628

Project Period : 2 years

A renewable energy hybrid power plant, fed by photovoltaic (PV) and fuel cell (FC) sources with a supercapacitor storage device and suitable for distributed generation applications, is proposed herein. The PV is used as the main generator; the FC acts as a power source, feeding only the insufficiency power (steady-state) from the PV; and the supercapacitor functions as an auxiliary source for supplying the deficiency power (transient and steady-state) from the PV and the FC.

For high power applications and optimization in power converters, 4-phase parallel boost converters, 2-phase parallel boost converters, and 4-phase parallel bidirectional converters are implemented for the FC converter, the PV converter, and a storage device, respectively.

A mathematical model (reduced-order model) of the FC, PV, and supercapacitor converters is described for the control of the power plant. Using the nonlinear approach based on the flatness property, we propose a simple solution to the dynamic optimization, stabilization,

247628

and robustness problems in the hybrid power system. This is the key innovative contribution of this research project.

The prototype small-scale power plant studied was composed of a PEMFC system (1.2 kW), a PV array (0.8 kW), and a supercapacitor module (100 F). Experimental results authenticate the excellent control algorithm during load cycles.

The outputs from this research project are as follows. Nine (9) research and review papers were published in high impact factor international journals (6 papers published in *IEEE Transactions* and *IEEE Magazine* and 3 papers published in *Elsevier Journals*), and nine (9) technical papers were presented in international conferences. For human resource development, two (3) master degree students were graduated under the support of this project.

Keywords : Converters, fuel cells, hybrid, nonlinear control, photovoltaic, supercapacitor.

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

---

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และแบตเตอร์รี่

(ภาษาอังกฤษ) Hybrid DC Distributed System Supplied by Fuel Cell/ Solar Cell/Battery

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง
ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่อยู่ 1518 ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02-913-2500 Ext: 3332 โทรสาร 02-587-8255
E-mail: phtt@kmitnb.ac.th, phatiphat.thounthong@ensem.inpl-nancy.fr

3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก และอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

4. งบประมาณทั้งโครงการ 480,000 บาท

5. ระยะเวลาดำเนินงาน 2 ปี

6. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน เป็นที่รู้ทราบกันดีว่าเกิดวิกฤตพลังงานไปทั่วโลก ร่วมทั้งมลภาวะด้วย ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกในอนาคต มีนักวิจัยมากมายที่ทำการวิจัยในหัวข้อนี้ เพื่อลดการใช้น้ำมันและลดการกำเนิดก๊าซคาร์บอนไดอ๊อกไซน์ โซล่าเซลล์ทำงานโดยการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงแปลงพลังงานไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้า แน่นอนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้มาเปล่าๆ ในขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนมีราคาถูกมากในเมืองไทยเมื่อเทียบกับน้ำมัน ทั้งเซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์แหล่งกำเนิดพลังงานที่สะอาด 100 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งมีราคาถูกลงมากแล้วในปัจจุบัน เพราะมีการวิจัยและนำไปใช้งานมากขึ้นนั้นเอง

ส่วนของโซล่าเซลล์ มีการวิจัยมาหลายสิบปี ทั้งในและต่างประเทศ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่มีหัวข้อวิจัยในประเทศไทยเลย ขณะที่ต่างประเทศในยุโรป อเมริกา ญี่ปุ่น หรือเกาหลี ได้ทำการวิจัยด้านเซลล์เชื้อเพลิงและการประยุกต์นำไปใช้งานมาหลายปีแล้ว หลายๆ แห่งได้ทำการสาธิตในการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้งานในรถยนต์หรือในโรงไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัท Honda และ Toyota ได้สร้าง

รถยนต์ไฟฟ้าต้นแบบที่มีเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งสามารถทำงานได้ดี ในอนาคต ข้างหน้า เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำไปใช้งานจริงมากขึ้น และราคาจะถูกลง

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับตัวอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาใช้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM จะนิยมใช้งานกันมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต เพราะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และง่ายในการสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่าจุดด้อยทางเทคนิคของเซลล์เชื้อเพลิงคือมีความเฉื่อยทางไฟฟ้าที่สูง มีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิ ระบบการจ่ายเชื้อเพลิงอินพุตของอากาศและก๊าซไฮโดรเจน ประกอบด้วยปั๊มและวาล์ว บางระบบอาจจะเป็นระบบแปลงก๊าซไฮโดรเจน ถ้าโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงดึงกำลังจากเซลล์เชื้อเพลิงที่รวดเร็วจะทำให้แรงดันตกลงต่ำกว่าปกติในช่วงสั้นๆ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การกระหายเชื้อเพลิง" ซึ่งจะทำให้สมรรถนะและอายุการใช้งานของมันลดลง ดังนั้นการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ในงานที่มีไดนานิกส์สูงๆ กระแสหรือกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องจำกัดเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ ด้วยเหตุนี้เองระบบจ่ายไฟด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องมีแหล่งจ่ายสำรองช่วยจ่ายไฟอาจจะเป็นแบตเตอร์รี่หรือซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบเมื่อโหลดดึงกำลังสูงช่วงสั้นๆ เช่นช่วงมอเตอร์เร่งหรือเบรก

เป้าหมายของโครงการ เพื่อนำเสนอองค์ความรู้ใหม่ในการจ่ายไฟร่วมกันของเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และแบตเตอร์รี่ชนิดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ สิ่งที่ยากลำบากคือการบริหารจัดการพลังงานในระบบให้สมดุล (Energy Management Algorithm) เพราะระบบมีแหล่งจ่ายหลายตัว งานวิจัยส่วนใหญ่ก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง จะนำเสนอผลการจำลองมากกว่า ผลลัพธ์ที่ได้จริงทำให้ความน่าเชื่อถือลดลงมาก ดังนั้นโครงการนี้เน้นทดลองจริงในห้องวิจัย

ผู้วิจัยและที่ปรึกษา ทั้งในประเทศและต่างประเทศ (ฝรั่งเศส) มีประสบการณ์ด้านเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์ แบตเตอร์รี่ และอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากว่า 10 ปี และปัจจุบันก็ยังเป็นที่ปรึกษาเครือข่ายวิชาการ ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้กับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบจ่ายไฟกระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และแบตเตอร์รี่ชนิดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เพื่อเป็นการประยุกต์นำเซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์ไปใช้งานในประเทศให้มีมากขึ้น เพื่อทดแทนการขาดแคลนพลังงานในอนาคตและการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่สะอาด

7. วัตถุประสงค์

1). สร้างระบบจ่ายไฟฟ้าที่มาจากแหล่งพลังงานทางเลือกคือโซล่าเซลล์เป็นแหล่งจ่ายหลักและเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายช่วย

2). เพื่อใช้แบตเตอร์รี่ชนิดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นตัวเก็บพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์ช่วยจ่ายไฟช่วงที่มีการกระชากของโหลดและเก็บสะสมพลังงานที่ได้จากโซล่าเซลล์ (แสงแดดตอนกลางวัน)

3). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงไปยังระบบจ่ายไฟตรงที่มีราคาถูก

4). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับโซล่าเซลล์ไปยังระบบจ่ายไฟตรงที่มีราคาถูก

5). เพื่อสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติในการจัดการพลังงานของระบบทั้งเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

8. ระเบียบวิธีวิจัย

1). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของวงจรแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์ ตัดสินใจเลือกวงจรที่เหมาะสม

2). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนเทคนิคการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ตัดสินใจเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์

3). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพลังงานที่เป็นระบบจ่ายไฟแบบผสม ตัดสินใจเลือกวิธีการที่เหมาะสม

4). วิเคราะห์และเขียน Context Diagram ทั้งระบบ

5). แตกระบบเป็น Modules แล้วเขียนออกมาเป็นบล็อกไดอะแกรมย่อย แล้วกระจายงานกันระหว่างทีมวิจัย

6). สมการทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB จะถูกนำมาใช้เพื่อจำลองการทำงานของระบบก่อนทดลองกับงานจริงและเพื่อเปรียบเทียบผลจากงานจริงกับการคำนวณ

7). บล็อกแต่ละบล็อกจะถูกออกแบบเพื่อสร้างวงจรจริง ทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุม

8). บล็อกย่อยแต่ละบล็อกถูกสร้างและทดสอบแยกกันอย่างอิสระก่อน ซึ่งจะมีการปรับปรุงถ้าจำเป็น

9). รวมบล็อกทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วทำการทดสอง

10). เขียนรายงาน สรุปงานวิจัย

9. การเชื่อมโยงกับนักวิจัยที่เป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาที่ทำการวิจัย

โครงการวิจัยนี้อยู่ภายใต้ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือกับ Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy University, ประเทศฝรั่งเศส เป็นงานวิจัยภายใต้กรอบงานวิจัย "Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research 2009-2010" โดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กับกระทรวงศึกษาธิการของประเทศฝรั่งเศส มีนักวิจัยและคณะที่ปรึกษาที่ Nancy University จำนวน 3 ท่านคือ

1). Prof.Dr.Bernard Davat

2). Prof.Dr.Stéphane Raël

3). Prof.Dr.Serge Pierfederici

Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy,

Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy Université

2, Avenue de la Forêt de Haye, 54516 Vandœuvre-lès-Nancy, France

E-mail : Bernard.Davat@ensem.inpl-nancy.fr, Stephane.Rael@ensem.inpl-nancy.fr

Serge.Pierfederici@ensem.inpl-nancy.fr

10. Output จากโครงการวิจัย

10.1. ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (The Thailand Research Fund (TRF) under Grant MRG5180348)

10.1.1 **P. Thounthong**, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, and M. Hinaje, "Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3892–3904, Oct. 2009. (2009 Impact Factor: **1.488**) (ดูเอกสารแนบ)

10.1.2 **P. Thounthong**, V. Chunkag, P. Sethakul, S. Sikkabut, S. Pierfederici, and B. Davat, "Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source," *J. Power Sources*, 2010 (in press). (2009 Impact Factor: **3.792**) (ดูเอกสารแนบ)

10.1.3 **P. Thounthong**, B. Davat, S. Raël, and P. Sethakul, "Fuel cell high power applications," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 32–46, Mar. 2009. (2009 Impact Factor: **1.750**) (ดูเอกสารแนบ)

10.1.4 **P. Thounthong**, B. Davat, S. Raël, and P. Sethakul, "Fuel starvation: Analysis of a PEM fuel cell system," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 52–59, Jul./Aug. 2009. (2009 Impact Factor: **0.727**) (ดูเอกสารแนบ)

10.1.5 **P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications," *J. Power Sources*, no. 193, no. 1, pp. 376–385, August 2009. (2009 Impact Factor: 3.792) (ดูเอกสารแนบ)**

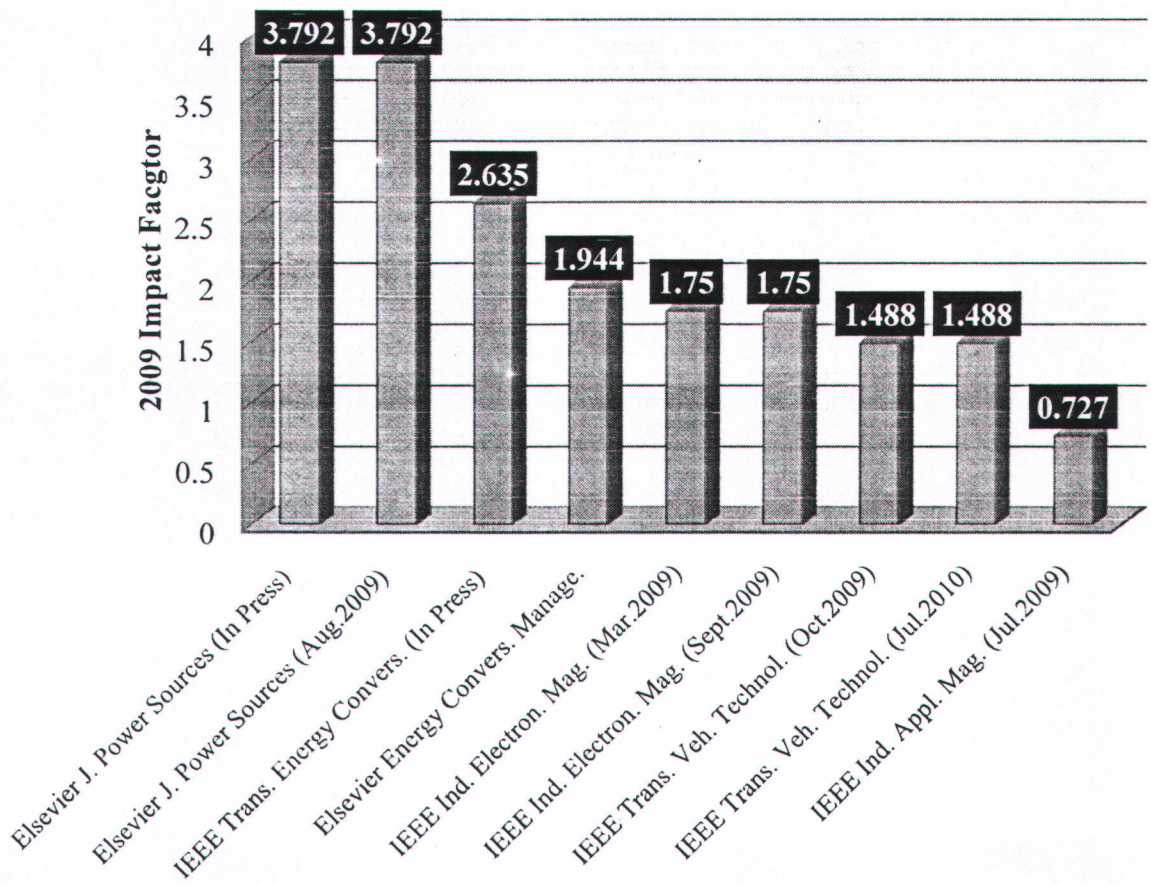
10.1.6 **P. Thounthong** and S. Raël, "The Benefits of hybridization," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, no. 3, pp. 25–37, Sept. 2009. (2009 Impact Factor: **1.750**) (ดูเอกสารแนบ)

10.1.7 **P. Thounthong and B. Davat, "Study of a multiphase interleaved step-up converter for fuel cell high power applications," *Energy Convers. Manage.*, vol. 51, no. 1, pp. 826–832, April 2010. (2009 Impact Factor: 1.944) (ดูเอกสารแนบ)**

10.1.8 **P. Thounthong**, S. Pierfederici, J.-P. Martin, M. Hinaje, and B. Davat, "Modeling and control of fuel cell/supercapacitor hybrid source based on differential flatness control," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 9, pp. 2700–2710, July 2010. (2009 Impact Factor: **1.488**) (ดูเอกสารแนบ)

10.1.9 **P. Thounthong, S. Pierfederici, and B. Davat, "Analysis of differential flatness-based control for a fuel cell hybrid power source," *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2010 (in press). (2009 Impact Factor: 2.635) (ดูเอกสารแนบ)**

กราฟสรุปจำนวนบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ



10.2. การเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (The Thailand Research Fund (TRF) under Grant MRG5180348)

10.2.1 **P. Thounthong**, V. Chunkag, P. Sethakul, S. Pierfederici, and B. Davat, "Energy Management of Fuel Cell/Solar Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source for Distributed Generation System," *in Proceeding of the Eleventh Grove Fuel Cell Symposium*, Queen Elizabeth II Conference Centre, Westminster, London, United Kingdom, 22-24 September 2009. Organized by Elsevier Publisher.

10.2.2 **P. Thounthong**, V. Chunkag, P. Sethakul, and B. Davat, "High-gain high-power converter for fuel cell applications," *in Proceeding of the Eleventh Grove Fuel Cell Symposium*, Queen Elizabeth II Conference Centre, Westminster, London, United Kingdom, 22-24 September 2009. Organized by Elsevier Publisher.

10.2.3 **P. Thounthong**, P. Sethakul, S. Raël, and B. Davat, "Performance Evaluation of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source for Vehicle Applications," *in Proceeding of the 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS-2009)*, Houston, Texas, USA, 4-8 October 2009. pp. 1-8 (CD-ROM).

10.2.4 **P. Thounthong**, N. Poonnoi, P. Sethakul, and B. Davat, "Performance Evaluation of Modified 4-phase Interleaved Fuel Cell Converter for High-Gain High-Power Applications," *in Proceeding of the 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS-2009)*, Houston, Texas, USA, 4-8 October 2009. pp. 1-8 (CD-ROM).

10.2.5 **P. Thounthong**, P. Sethakul, S. Raël, and B. Davat, "Fuel Cell Current Ripple Mitigation by Interleaved Technique for High Power Applications," *in Proceeding of the 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS-2009)*, Houston, Texas, USA, 4-8 October 2009. pp. 1-8 (CD-ROM).

10.2.6 **P. Thounthong**, S. Sikkabut, P. Sethakul, and B. Davat, "Control Algorithm of Renewable Energy Power Plant Supplied by Fuel Cell/Solar Cell/Supercapacitor Power Source," *in Proceeding of the 2010 International Power Electronics Conference (IPEC-Sapporo, ECCE ASIA)*, Sapporo, Hokkaido, Japan, USA, 21-24 June 2010, pp. 1155-1162, Organized by The Industry Applications Society of the Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ) and IEEE.

10.2.7 **P. Thounthong**, S. Sikkabut, P. Sethakul, S. Pierfederici, and B. Davat, "Fuel Cell Power Regulation Based-on Differential Flatness Theory for High-Power Converter Applications," *in Proceeding of the 2010 IEEE-XIX International Conference on Electrical Machines* (ICEM2010), Rome, Italy, 6-10 September 2010.

10.2.8 **P. Thounthong**, S. Pierfederici, and B. Davat, "Performance Evaluation of Differential Flatness Based-Control of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Power Source," *in Proceeding of the 2010 IEEE-XIX International Conference on Electrical Machines* (ICEM2010), Rome, Italy, 6-10 September 2010.

10.2.9 **P. Thounthong**, P. Mungporn, and B. Davat, "A Nonlinear Control Approach to the Energy Management of Solar Power Plant with Supercapacitor for Grid-Independent Applications," *in Proceeding of the 2010 IEEE-XIX International Conference on Electrical Machines* (ICEM2010), Rome, Italy, 6-10 September 2010.

10.3 นักวิจัยที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทจำนวน 3 คน

10.3.1 นายณิชมน พูนน้อย

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง "High Voltage Gain Non-Isolated Converter for Fuel Cell Distributed Generation"

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

10.3.1 นายสิทธิกร ธนาวุฒิ

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง "Hybrid DC Source by Fuel Cell and Lithium-ion Battery"

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

10.3.1 นายประเสริฐ สารการ

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง "The Investigation in Hybrid DC Energy Control of Fuel Cell and Battery"

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยโครงการ "ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และแบตเตอร์รี่" ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากทุน "พัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่" ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่มีส่วนสำคัญในการผลักดันให้คณะผู้วิจัยดำเนินการวิจัยดำเนินการวิจัยอย่างมีประสิทธิผล ทั้งในส่วนที่เป็นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่และการสร้างทรัพยากรมนุษย์ในระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนการสร้างผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติและการสร้างต้นแบบโรงไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก ซึ่งมีประโยชน์ในงานด้านวิศวกรรมต่อไป

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการยืมใช้เครื่องมือต่างๆ ที่สถาบันนวัตกรรมไทย-ฝรั่งเศส (TFII) และที่ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า (TE) และที่ขาดไม่ได้ขอขอบคุณนายสุวัจน์ สิกบุตร และนายพงษ์ศิริ มุ่งพร วิศวกรไฟฟ้า ที่สถาบันนวัตกรรมไทย-ฝรั่งเศส ที่ช่วยเหลืองานวิจัยด้านฮาร์ดแวร์เป็นอย่างมาก

ความร่วมมือด้านงานวิจัยและคำที่ปรึกษาจาก Prof.Dr.Bernard Davat, Prof.Dr.Stéphane Raël และ Prof.Dr.Serge Pierfederici ที่ Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy (GREEN), Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy University, France ยังมีส่วนกระตุ้นส่งเสริมให้มีการวิจัยระดับแนวหน้า มีการแลกเปลี่ยนบุคลากรซึ่งกันและกัน ขณะที่งานวิจัยบางส่วนได้รับการสนับสนุนจาก French National Center for Scientific Research (CNRS) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หัวหน้าโครงการวิจัยต้องเดินทางไปทำวิจัยบางส่วนที่ GREEN Lab. ต้องขอบคุณวิศวกรและช่างเทคนิคที่ GREEN Lab. ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและช่วยเหลืออื่นๆ

โครงการวิจัยนี้อยู่ภายใต้ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือกับ Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy University, ประเทศฝรั่งเศส เป็นงานวิจัยภายใต้กรอบงานวิจัย "Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research 2009-2010" โดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กับกระทรวงศึกษาธิการของประเทศฝรั่งเศส

สุดท้ายที่ขาดไม่ได้ ขอขอบพระคุณคุณสุกาญจนา เลขพัฒน์ หัวหน้าสำนักงาน สถาบันนวัตกรรมไทย-ฝรั่งเศส ที่ติดต่อประสานงานโครงการวิจัย "Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research 2009-2010" และให้กำลังใจเสมอ

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		ii
Abstract		iv
หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)		vi
สารบัญ		xii
สารบัญตาราง		xiii
สารบัญภาพ		xiv
บทที่		
1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง		1
1.1	เซลล์เชื้อเพลิง	1
1.2	เซลล์แสงอาทิตย์	6
1.3	แบตเตอรี่ชนิดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	11
1.4	วงจรแปลงไฟแบบทิศทางเดียวสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แสงอาทิตย์	20
1.5	วงจรแปลงไฟแบบสองทิศทางสำหรับแบตเตอรี่	27
1.6	ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)	31
2 ขั้นตอนการดำเนินงาน		33
2.1	ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง	33
2.2	ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	48
2.3	ตัวแปลงไฟสำหรับแบตเตอรี่ชนิดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	54
2.4	การบริหารจัดการพลังงานในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอร์รี่ชนิดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	62
3 วิธีการทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง		70
3.1	รายละเอียดชุดทดลอง	70
3.2	รายละเอียดระบบควบคุม	72
3.2	ผลการทดลอง	74
4 สรุป		83
เอกสารอ้างอิง		84
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.		87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน	17
2-1	ตัวแปรต่าง ๆ ของแกนเฟอร์ไรต์เบอร์ EE55/55/21	36
3-1	รายละเอียดแหล่งจ่ายไฟแต่ละตัว	71
3-2	พารามิเตอร์ของระบบควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรง	73
3-3	พารามิเตอร์ของระบบควบคุมพลังงานรวม (หรือพลังงานของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์)	73

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	แนวคิดเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบที่คิดค้นโดย Sir William Robert Grove	1
1-2	เซลล์เชื้อเพลิง 12 kW สำหรับสถานีอวกาศของนาซา	2
1-3	ชั้นต่างๆ ของเซลล์พื้นฐานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	2
1-4	การต่อเซลล์แบบอนุกรมของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มแรงดัน	3
1-5	เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 23 เซลล์ต่ออนุกรม	4
1-6	เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 47 เซลล์ต่ออนุกรม	4
1-7	ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	5
1-8	กราฟแรงดันต่อกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ชนิด PEM	5
1-9	ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W	6
1-10	ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	6
1-11	การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	7
1-12	กราฟลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	8
1-13	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับที่พักอาศัยที่เกาะง่าม จังหวัดตราด	9
1-14	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนำร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์	9
1-15	ระบบโซล่าเซลล์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected)	10
1-16	สนามเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก	10
1-17	ระบบส่งจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	11
1-18	แนวคิดรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต	11
1-19	โครงสร้าง Microscopic ของวัสดุอิเล็กโตรดแบบ active carbon ในซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	12
1-20	หลักการทำงานของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	13
1-21	โครงสร้างของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	13
1-22	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กของบริษัท NEC	14
1-23	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็ก (24 V, 0.4 F, 5.7 kW)	15
1-24	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT	15
1-25	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน	16
1-26	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน	16
1-27	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell (เรียกว่า Booscap) 1 เซลล์ และโมดูลที่ BCAP1200 ต่ออนุกรมกัน 12 ตัว	16
1-28	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	17

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
1-29	ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์	18
1-30	ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว	18
1-31	ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A ของบริษัท Maxwell	19
1-32	เปรียบเทียบพลังงานต่อน้ำหนัก ($Wh \cdot kg^{-1}$) กับกำลังงานต่อน้ำหนัก ($W \cdot kg^{-1}$) ของเทคโนโลยีซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอร์รี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเที่ยมไอออนและแบบนิเกิลเมททอลไฮไดรส์	20
1-33	วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	20
1-34	วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส	21
1-35	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยว	22
1-36	วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส	22
1-37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการแปลงผันและวัฏจักรงาน เมื่อ r_{L1}/R มีการเปลี่ยนแปลง R คือค่าความต้านทานที่ต่อเป็นโหลดทางไฟฟ้า r_{L1} คือค่าความต้านทานภายในขดลวดเหนี่ยวนำ	23
1-38	วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกัน 2 วงจร	25
1-39	สัญญาณการสวิตช์ที่ต่างเฟสกัน 180 องศา กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ	25
1-40	กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($I_{CBus,RMS}$) กับวัฏจักรงานของวงจรแปลงผันที่มีการขนาน 2 วงจร	26
1-41	วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	28
1-42	วงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	28
1-43	สัญญาณต่างๆ ของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	29
1-44	แนวคิดระบบควบคุมแบบแฟลด ซึ่ง y คือตัวแปรเอาต์พุต y_{REF} คือตัวแปรเอาต์พุตที่อ้างอิง u คือตัวแปรอินพุตที่ควบคุม	32
2-1	วงจรทบแรงดันขนานกัน 4 เฟส	34
2-2	การควบคุมกระแสแบบลูปปิดของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 4 เฟส	39
2-3	วงจรสร้างสัญญาณพัลส์อ้างอิง	40
2-4	สัญญาณพัลส์ที่ห่างกัน 180 องศา และลดความถี่เหลือ 25 kHz	41
2-5	วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ไอซี SN74LS123	42
2-6	สัญญาณกระตุ้นจากไอซี 74LS123 ให้มีการเหลื่อมเฟส	42
2-7	วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม	43
2-8	สัญญาณสามเหลี่ยม	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-9	วงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PWM)	44
2-10	สัญญาณมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์	45
2-11	วงจรควบคุมแบบพีไอ	46
2-12	วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	47
2-13	สัญญาณที่ผ่านวงจรขับนำเกต	48
2-14	วงจรทบแรงดันขนาด 2 เฟส	49
2-15	แนวทางการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของวงจรทบแรงดัน	51
2-16	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบพีไอ	51
2-17	การต่อขาสัญญาณของ dsPIC30F2010	52
2-18	วงจรขับเกต	53
2-19	วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ 2 ทิศทาง	54
2-20	วงจรควบคุมกระแสของตัวแปลงไฟสำหรับแบตเตอร์รี่	58
2-21	วงจรเดดไทม์ (Dead time circuit)	59
2-22	เดดไทม์ของการขับมอสเฟต	60
2-23	วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	61
2-24	ไดอะแกรมของระบบจ่ายไฟด้วยเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	63
2-25	วงจรเทียบเคียงของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมที่นำเสนอ	64
2-26	ไดอะแกรมระบบควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบผสม	69
3-1	ชุดทดลองระบบจ่ายไฟแบบผสมต้นแบบขนาดเล็ก	70
3-2	แผงโซล่าเซลล์ (ติดตั้งบนดาดฟ้าสถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส)	71
3-3	โมดูลซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	71
3-4	จุดวัดแรงดันและกระแสของชุดทดลอง	72
3-5	การกำหนดค่าของตัวควบคุมโดยเลือกกำหนดค่า cutoff frequency	73
3-6	ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง	75
3-7	ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของโซล่าเซลล์	76
3-8	ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	77
3-9	การตอบสนองต่อการสเตปโหลดจาก 0 W ถึง 760 W ที่เวลา t = 10 ms	78
3-10	เปรียบเทียบไดนามิกส์การควบคุมแรงดันที่บัสไฟตรงของแหล่งจ่ายไฟแบบผสม ขณะที่มีการสเตปของโหลดค่าสูง	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-11	การตอบสนองของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมต่อโหลดรอบเดี่ยว	81
3-12	การตอบสนองของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมต่อโหลดหลายรอบ	82