



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ปวิพัทธ์ ทวนทอง และคณะ

มิถุนายน 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่

คณะผู้วิจัย

- 1). รศ.ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง
- 2). ผศ.ดร.พนาฤทธิ เศรษฐกุล

สังกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5380261

ชื่อโครงการ : แหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่

ชื่อนักวิจัย :

- 1). รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐิพัทธ์ ทวนทอง<sup>1,2</sup>
- 2). ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาฤทธิ เศรษฐกุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อีเมล: phtt@kmutnb.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

บทคัดย่อ:

โครงการวิจัยนี้นำเสนอโรงไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน จ่ายไฟโดยโซลาร์เซลล์ กังหันลมและเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีแบตเตอรี่ชนิดซูปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานจ่ายไฟฟ้า โซลาร์เซลล์และกังหันลมทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหลัก เซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายช่วยจ่ายไฟทั้งในสภาวะอยู่ตัวในกรณีที่ไฟไม่พอจากโซลาร์เซลล์และกังหันลม ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสำรองช่วยจ่ายไฟทั้งสภาวะไดนามิกส์และสภาวะอยู่ตัวในกรณีที่ไฟไม่พอจากโซลาร์เซลล์ กังหันลมและเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานกำลังสูงและการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปลงไฟกำลังสูง ตัวแปลงไฟแบบทบแรงดันที่ขนานกัน 4 ชุดถูกออกแบบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับโซลาร์เซลล์ และสำหรับกังหันลมและตัวแปลงไฟแบบสองทิศทางที่ขนานกัน 4 ชุดถูกออกแบบสำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์

โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกนำเสนอสำหรับการควบคุมโรงไฟฟ้านี้ โดยทฤษฎีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นของวิธีการแบบเบนเรียบ ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายขึ้นสำหรับปัญหาสำคัญด้านไดนามิกส์

ด้านเสถียรภาพ ด้านการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบของโรงไฟฟ้า ด้วยวิธีการควบคุมแบบใหม่นี้ทำให้โครงการวิจัยนี้นำเสนอผลงานต้นแบบ

โรงไฟฟ้าขนาดเล็กต้นแบบได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นจริง ประกอบไปด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิง (1.2 kW) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (0.8 kW) กังหันลม (1 kW) และโมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (100 F) ผลการทดลองพิสูจน์ยืนยันวิธีการควบคุมที่นำเสนอขณะมีโหลดหลายๆ แบบ

ผลงานวิจัยของโครงการนี้ได้สรุปเป็นบทความวิจัยและบทความวิชาการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มี impact factor สูง แล้วจำนวน 2 เรื่อง ที่ตีพิมพ์ใน IEEE Transactions และนำเสนอในที่ประชุมระดับนานาชาติจำนวน 3 เรื่อง ด้านการพัฒนาศักยภาพบุคลากรการวิจัยนั้น ประกอบด้วยนักวิจัยที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจำนวน 1 คนและนักศึกษาระดับปริญญาโทจำนวน 1 คน

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



## Abstract

---

**Project Code :** MRG5380261

**Project Title :** Distributed Generation by Fuel Cell/Solar Cell/Wind Turbine/Battery

**Investigator :**

- 1). Assoc.Prof.Dr.Phatiphat Thounthong<sup>1,2</sup>
- 2). Asst.Prof.Dr.Panarit Setthakul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Renewable Energy Research Centre  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

<sup>2</sup>Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

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

**Project Period :** 2 years

**Abstract:**

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

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

A mathematical model (reduced-order model) of the FC, PV, wind turbine 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, 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), a wind turbine generator (1 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. Two (2) research and review papers were published in high impact factor international journals published in *IEEE Transactions*, and three (3) technical papers were presented in international conferences. For human resource development, one (1) PhD student and one (1) master degree student were graduated under the support of this project.

**Keywords** : Converters, fuel cells, hybrid, nonlinear control, photovoltaic, supercapacitor, wind turbine



**หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)**  
**ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่**

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) แหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลม และแบตเตอรี่

(ภาษาอังกฤษ) Distributed Generation by Fuel Cell/Solar Cell/  
Wind Turbine/Battery

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ

ดร.ปฎิพัทธ์ ทวนทอง

ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ที่อยู่ 1518 ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

ที่อยู่ 1518 ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 02-913-2500 Ext: 3332 โทรสาร 02-587-8255

E-mail: [phtt@kmitnb.ac.th](mailto:phtt@kmitnb.ac.th)

3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก และอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

5. ระยะเวลาดำเนินงาน 2 ปี

6. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปมาก ทำให้ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของโลกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อมีความต้องการการใช้ไฟฟ้ามากขึ้นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่เรามี เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือน้ำมันก็ต้องถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่อผลิตไฟฟ้า แน่นอนว่าเมื่อมีความต้องการมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณวัตถุดิบเหล่านี้มีจำนวนลดลงทุกวัน ก็ย่อมทำให้ราคาของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตามกลไกตลาด อย่างที่เราเห็นอยู่ในกรณีของน้ำมันขณะนี้ มากกว่านั้นจากข้อมูลด้านวิทยาศาสตร์และข้อมูลการสำรวจพบว่ามีอีกประมาณ 35 ปีข้างหน้าน้ำมันจะหมดไปจากโลกแน่นอนไม่เพียงแค่นั้นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติเหล่านี้ เมื่อต้องทำการเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานความร้อนนั้นจะต้องมีการเผาไหม้เกิดขึ้น และไอเสียจากการเผาไหม้เหล่านี้เองที่เราเรียกกันว่าเป็นมลพิษทางอากาศ ก๊าซที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้เหล่านี้ก็ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ไนโตรเจนได-ออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสารพิษต่อร่างกาย

ในปัจจุบันหลาย ๆ ชาติในโลกซึ่งตระหนักถึงปัญหานี้ก็ได้มีการตกลงทำพันธสัญญาระหว่างกันในเรื่องเกี่ยวกับการรักษาสภาพแวดล้อม ที่เรารู้จักกันดีก็คือ Kyoto Protocol ซึ่งพยายามที่จะให้ประเทศในโลกพยายามลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่าง ๆ ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Global Warming โดยหลาย ๆ ประเทศก็ให้ความร่วมมืออย่างดี ก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ส่วนมากจะถูกปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมหนัก ซึ่งก็รวมไปถึงโรงไฟฟ้าที่ใช้การเผาไหม้ของก๊าซ น้ำมัน และถ่านหินด้วย ดังนั้นจะว่าไปแล้วการผลิตไฟฟ้าก็เป็นส่วนหนึ่งที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ และทำให้เกิดปัญหา Global Warming ด้วย

ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าด้วยวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติใต้พื้นโลกหรือพลังงานจากฟอสซิลในรูปแบบเดิมๆ นั้นไม่สามารถทำให้ประโยชน์ทางธุรกิจ พลังงาน และสิ่งแวดล้อมก้าวหน้าไปพร้อม ๆ กันได้อย่างเต็มรูปแบบ เพราะการขยายตัวขององค์ประกอบหนึ่ง ย่อมจะส่งผลกระทบต่อในทางตรงกันข้ามกับอีกส่วนหนึ่งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นในปัจจุบัน พลังงานทดแทน (Renewable Energy) จึงสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งพลังงานเหล่านี้ก็ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานจากของเหลือใช้ทางการเกษตร (Biomass Energy) หรือพลังงานไฮโดรเจนหรือเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานจากไฮโดรเจนมีการกล่าวถึงกันมากที่สุดในปัจจุบัน ขณะที่พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานทางเลือกที่มีการใช้งานมากที่สุดในประเทศ

ยิ่งกว่านั้น ขณะที่ในรอบปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติประมาณ 70% ซึ่งเป็นการพึ่งพาแหล่งเชื้อเพลิงแหล่งเดียวมากเกินไป ส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรต่อสถานการณ์ไฟฟ้าของประเทศ กระทรวงพลังงานจึงกำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี นับจากสัดส่วน 6% ในปี 2551 ขึ้นไปเป็น 20% ในปี 2566 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศฉบับ 2007 (Power Development Plan 2007) จึงกำหนดทางเลือกในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานนิวเคลียร์เพิ่มในแผนด้วย

เป้าหมายของโครงการวิจัยนี้คือนำเสนอองค์ความรู้ใหม่ในการจ่ายไฟร่วมกันของเซลล์เชื้อเพลิงโซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่ สิ่งที่ยากลำบากคือการบริหารจัดการพลังงานในระบบให้สมดุล (Energy Management Algorithm) ทำงานที่จุดที่ดีที่สุด (Optimization) เพราะระบบมีแหล่งจ่ายหลายตัว และแหล่งจ่ายแต่ละตัวทำงานที่สภาวะต่างกัน (เช่น แดดจัด ฝนตก ลมแรง ไม่มีลม) ถ้าระบบควบคุมทำงานอย่างอัตโนมัติ ทำให้ระบบการจ่ายไฟมีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพ งานวิจัยส่วนใหญ่ก่อนหน้านี้จะนำเสนอผลการจำลองมากกว่า ผลลัพธ์ที่ได้จริงทำให้ความน่าเชื่อถือลดลงมาก ดังนั้นโครงการนี้นั้นทดลองจริงและเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จะมีผลเป็นอย่างมากในการผลิตไฟฟ้าในประเทศในอนาคต ระบบจ่ายไฟจะเป็นการจ่ายไฟร่วมกันจากหลายแหล่งพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพลังงานทางเลือก



ขณะที่ผู้วิจัยและที่ปรึกษา ทั้งในประเทศและต่างประเทศ (ฝรั่งเศส) มีประสบการณ์ด้านเซลล์เชื้อเพลิง โคล่าเซลล์ กังหันลม แบตเตอรี่ และอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากกว่า 10 ปี และปัจจุบันก็ยังเป็นที่ปรึกษาเครือข่ายวิชาการ ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้กับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ยิ่งกว่านั้นงานวิจัยนี้จะเข้าไปอยู่ในกรอบงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้รับให้ดำเนินงานวิจัย เรื่อง POWER PROCESSING UNITS FOR FUEL CELLS (PEMFC AND SOFC) ภายใต้โครงการระหว่างประเทศ “Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research 2009-2011” ให้การสนับสนุนโดยกระทรวงศึกษาธิการประเทศไทย โดย สกอ. และกระทรวงศึกษาธิการประเทศฝรั่งเศส จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบ สร้างและทดสอบระบบจ่ายไฟพร้อม เพื่อเป็นการประยุกต์นำพลังงานทางเลือกไปใช้งานในประเทศให้มีมากขึ้น เพื่อทดแทนการขาดแคลนพลังงานในอนาคตและการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่สะอาด

## 7. วัตถุประสงค์

- 1). สร้างระบบจ่ายไฟฟ้าที่มาจากแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดคือโคล่าเซลล์ กังหันลม และเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายหลัก
- 2). เพื่อใช้แบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นตัวเก็บพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง โคล่าเซลล์และกังหันลม ช่วยจ่ายไฟช่วงที่มีการกระชากของโหลด และเก็บสะสมพลังงานที่ได้จากโคล่าเซลล์ (แสงแดดตอนกลางวัน) และเก็บสะสมพลังงานที่ได้จากกังหันลม ช่วงที่มีลมแรง
- 3). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงไปยังระบบจ่ายไฟตรง
- 4). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับโคล่าเซลล์ไปยังระบบจ่ายไฟตรง
- 5). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟตรงสำหรับกังหันลม
- 6). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่
- 7). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟสลับ (inverter) 1 เฟส
- 8). เพื่อสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติในการจัดการพลังงานของระบบ

## 8. ระเบียบวิธีวิจัย

- 1). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของวงจรแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง โคล่าเซลล์ กังหันลม และแบตเตอรี่ตัดสินใจเลือกวงจรที่เหมาะสม
- 2). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนเทคนิคการชาร์จแบตเตอรี่ ตัดสินใจเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับระบบ
- 3). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพลังงานที่เป็นระบบจ่ายไฟแบบผสม ตัดสินใจเลือกวิธีการที่เหมาะสม

- 4). วิเคราะห์และเขียน Context Diagram ทั้งระบบ
- 5). แยกระบบเป็น Modules แล้วเขียนออกมาเป็นบล็อกไดอะแกรมย่อย แล้วกระจายงานกันระหว่างทีมวิจัย
- 6). สมการทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB จะถูกนำมาใช้เพื่อจำลองการทำงานของระบบก่อนทดลองกับงานจริง และเพื่อเปรียบเทียบผลจากงานจริงกับการคำนวณ
- 7). บล็อกแต่ละบล็อกจะถูกออกแบบเพื่อสร้างวงจรจริง ทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุม
- 8). บล็อกย่อยแต่ละบล็อกถูกสร้างและทดสอบแยกกันอย่างอิสระก่อน ซึ่งจะมีการปรับปรุงถ้าจำเป็น
- 9). รวมบล็อกทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วทำการทดสอบ เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB รวมทั้งการปรับแต่งระบบ
- 10). เขียนรายงาน สรุปงานวิจัย

## 9. การเชื่อมโยงกับนักวิจัยที่เป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาที่ทำการวิจัย

โครงการวิจัยนี้อยู่ภายใต้ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กับ Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy University, ประเทศฝรั่งเศส เป็นงานวิจัยภายใต้กรอบงานวิจัย “Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research 2009-2011” 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](mailto:Bernard.Davat@ensem.inpl-nancy.fr),  
[Stephane.Rael@ensem.inpl-nancy.fr](mailto:Stephane.Rael@ensem.inpl-nancy.fr)

[Serge.Pierfederici@ensem.inpl-nancy.fr](mailto:Serge.Pierfederici@ensem.inpl-nancy.fr)

## 10. Output จากโครงการวิจัย

### 10.1. ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (The Thailand Research Fund (TRF) under Grant MRG5380261)

10.1.1 **P. Thounthong**, “Model Based-Energy Control of a Solar Power Plant With a Supercapacitor for Grid-Independent Applications,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1210–1218, Dec. 2011. (2010 Impact Factor: 2.260) (See page 90)

10.1.2 **P. Thounthong**, “A New Control Law Based on the Differential Flatness Principle for Multiphase Interleaved DC–DC Converter,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 57, no. 11, pp. 903–907, Nov. 2010. (2010 Impact Factor: 1.334) (See page 99)

### 10.2. การเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (The Thailand Research Fund (TRF) under Grant MRG5380261)

10.2.1 P. Thounthong, S. Sikkabut, P. Sethakul, B. Davat, “Differential Flatness Based-Control of Wind Generator/Supercapacitor Power Plant,” in *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, ROME-Italy, 8-11 May 2011, pp. 1-4 (CD-ROM).

10.2.2 P. Thounthong, S. Sikkabut, P. Sethakul, B. Davat, “Model Based-Control of Three-Level Boost Converter for Fuel Cell Applications,” in *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, ROME-Italy, 8-11 May 2011, pp. 1-4 (CD-ROM).

10.2.3 A. Luksanasakul, P. Koseeyaporn, P. Sethakul, B. Davat, and P. Thounthong, “Fuzzy Control Law Based-on Flatness Property for a DC Link Stabilization for a Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Power Plant,” in *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER (ICCEP)*, Ischia – Italy, 14-16 June 2011, pp. 73-80.

### 10.3 นักวิจัยที่สำเร็จการศึกษา

ระดับปริญญาเอกจำนวน 1 คน

นายวัฒนา แก้วมณี

**Thesis Title:** Modélisation des piles à combustible dans un environnement d'électronique de puissance

**University:** Université de Lorraine, Nancy, France

**หมายเหตุ** เป็นที่ปรึกษาร่วม Co-director

ระดับปริญญาโทจำนวน 1 คน

นายนพดล หนั้วอินปิ่น

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง “การควบคุมแหล่งจ่ายไฟตรงแบบผสมด้วยเซลล์แสงอาทิตย์และซูเปอร์คาปาซิเตอร์”

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**หมายเหตุ** เป็นที่ปรึกษาร่วม



## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยโครงการ “แหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลม และแบตเตอรี่” ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากทุน “พัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่” ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่มีส่วนสำคัญในการผลักดันให้คณะผู้วิจัยดำเนินการวิจัยดำเนินการวิจัยอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในส่วนที่เป็นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่และการสร้างทรัพยากรมนุษย์ในระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนการสร้างผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติและการสร้างต้นแบบโรงไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก ซึ่งมีประโยชน์ในงานด้านวิศวกรรมต่อไป

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการยืมใช้เครื่องมือต่างๆ ที่สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส (TFII) และที่ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า (TE) และที่ขาดไม่ได้ขอขอบคุณนายสุวัจน์ สิกบุตรและนายพงษ์ศิริ มุ่งพร วิศวกรไฟฟ้า ที่สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-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

โครงการวิจัยนี้อยู่ภายใต้ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กับ Université de Lorraine ประเทศฝรั่งเศส เป็นงานวิจัยภายใต้กรอบงานวิจัย “Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research 2009-2010” โดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กับกระทรวงศึกษาธิการของประเทศฝรั่งเศส

สุดท้ายที่ขาดไม่ได้ ขอขอบพระคุณคุณสุภาภรณ์ เลขพัฒน์ หัวหน้าสำนักงาน สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส ที่ติดต่อประสานงานโครงการวิจัย “Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research 2009-2010” และให้กำลังใจเสมอ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ii
Abstract	iv
หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)	vi
กิตติกรรมประกาศ	xiii
สารบัญ	xv
สารบัญตาราง	xvi
สารบัญภาพ	xvii
บทที่	
<b>1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>1</b>
1.1 เซลล์เชื้อเพลิง	1
1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (หรือโซลาร์เซลล์)	7
1.3 กังหันลม	13
1.4 แบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์	15
1.5 การขนานตัวแปลงไฟที่มีการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส	25
1.6 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)	28
<b>2 ขั้นตอนการดำเนินงาน</b>	<b>31</b>
2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน	31
2.2 การบริหารจัดการพลังงานในโรงไฟฟ้า	42
<b>3 วิธีการทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	<b>43</b>
3.1 รายละเอียดชุดทดลอง	43
3.2 ผลการทดลองตัวแปลงไฟ	48
3.3 ผลการทดลองโรงไฟฟ้าแบบผสมต้นแบบโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์	70
<b>4 สรุป</b>	<b>81</b>
เอกสารอ้างอิง	82
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน	22
3-1 รายละเอียดแหล่งจ่ายไฟแต่ละตัว	45



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 แนวคิดเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบที่คิดค้นโดย Sir William Robert Grove	2
1-2 เซลล์เชื้อเพลิง 12 kW สำหรับสถานีอวกาศของนาซา	2
1-3 ชั้นต่างๆ ของเซลล์พื้นฐานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	3
1-4 การต่อเซลล์แบบอนุกรมของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มแรงดัน	4
1-5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 23 เซลล์ต่ออนุกรม	5
1-6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 47 เซลล์ต่ออนุกรม	5
1-7 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	6
1-8 กราฟแรงดันต่อกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ชนิด PEM	7
1-9 ลักษณะสมบัติสถานะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W	7
1-10 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	8
1-11 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	9
1-12 กราฟลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	10
1-13 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับที่พักอาศัยที่เกาะง่าม จังหวัดตราด	11
1-14 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนำร่องเครื่องบินในประเทศสวีตเซอร์แลนด์	11
1-15 ระบบโซลาร์เซลล์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected)	12
1-16 สนามเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก	12
1-17 ระบบส่งจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	13
1-18 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม	14
1-19 กราฟลักษณะสมบัติของกังหันลม	15
1-20 แนวคิดรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต	16
1-21 โครงสร้าง Microscopic ของวัสดุอิเล็กโทรดแบบ active carbon ในซูเปอร์คาปาซิเตอร์	17
1-22 หลักการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	17
1-23 โครงสร้างของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	18
1-24 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กของบริษัท NEC	19
1-25 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็ก (24 V, 0.4 F, 5.7 kW)	20



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
1-26 ชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT	20
1-27 ชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน	21
1-28 ชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน	21
1-29 ชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell (เรียกว่า Booscap) 1 เซลล์ และโมดูลที่ BCAP1200 ต่ออนุกรมกัน 12 ตัว	21
1-30 ชูปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	22
1-31 ลักษณะสมบัติของชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์	23
1-32 ลักษณะสมบัติของชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว	23
1-33 ลักษณะสมบัติของชูปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A ของบริษัท Maxwell	24
1-34 เปรียบเทียบพลังงานต่อน้ำหนัก ( $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) กับกำลังงานต่อน้ำหนัก ( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ของเทคโนโลยีชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเทียมไอออนและแบบนิเกิลเมททอลไฮไดรด์	25
1-35 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกัน 2 วงจร	26
1-36 สัญญาณการสวิตช์ที่ต่างเฟสกัน 180 องศา กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ	26
1-37 กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ( $I_{CBus,RMS}$ ) กับวัฏจักรงานของวงจรแปลงผันที่มีการขนาน 2 วงจร	27
1-38 แนวคิดระบบควบคุมแบบฟลัด ซึ่ง $y$ คือตัวแปรเอาต์พุต $y_{REF}$ คือตัวแปรเอาต์พุตที่อ้างอิง $u$ คือตัวแปรอินพุตที่ควบคุม	29
2-1 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์ กังหันลม และแบตเตอรี่	31
2-2 วงจรเทียบเคียงของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมที่น่าเสนอ	34
2-3 ไดอะแกรมระบบควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบผสม	39
2-4 ฟังก์ชันคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโซล่าเซลล์ $MPPT_{PV}$	41
2-5 ฟังก์ชันคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลม $MPPT_{WD}$	42
3-1 ชุดทดลองโรงไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็ก	43
3-2 แผงโซล่าเซลล์ (ติดตั้งบนอาคารฟ้าสถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส)	44

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-3 โมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์	44
3-4 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Converter)	45
3-5 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับโซล่าเซลล์ (Solar Cell Converter)	46
3-6 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับกังหันลม (Wind Turbine Converter)	46
3-7 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor Converter)	47
3-8 ภาพถ่ายอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส	47
3-9 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 8 A	49
3-10 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 20 A	50
3-11 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 44 A	51
3-12 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับโซล่าเซลล์ ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 6 A	53
3-13 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับโซล่าเซลล์ ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 8 A	54
3-14 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับโซล่าเซลล์ ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 10 A	55
3-15 <u>ผลการทดลองจริง</u> การค้นหากำลังสูงสุดของโซล่าเซลล์โดย MPPT	56
3-16 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับกังหันลม ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 12 A	58
3-17 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับกังหันลม ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 28 A	59
3-18 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับกังหันลม ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 40 A	60

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-19 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟ สำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ +6 A	62
3-20 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟ สำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ +12 A	63
3-21 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟ สำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ -8 A	64
3-22 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟ สำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ -16 A	65
3-23 <u>ผลการทดลองจริง</u> ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของ ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (ลูบใน) ขณะคำสั่งอ้างอิงของกำลังของ ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Power Reference) สเตปจาก -100 W ไปยัง +100 W	67
3-24 <u>ผลการทดลองจริง</u> ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของ ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (ลูบใน) ขณะคำสั่งอ้างอิงของกำลังของ ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Power Reference) สเตปจาก -700 W ไปยัง +700 W	68
3-25 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ขณะที่โหลดดึงกระแส 1.41 Arms	69
3-26 <u>ผลการทดลองจริง</u> สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ขณะที่โหลดดึงกระแส 3.61 Arms	70
3-27 ไดอะแกรมการทดลองโรงไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็ก	71
3-28 <u>ผลการทดลองจริง</u> การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด กรณีที่ 1: โหลดสเตปจาก 150 W <--> 500 W	73
3-29 <u>ผลการทดลองจริง</u> การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด กรณีที่ 2: โหลดสเตปจาก 250 W <--> 700 W	75
3-30 <u>ผลการทดลองจริง</u> การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด กรณีที่ 3: โหลดสเตปจาก 250 W <--> 1,000 W	76

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-31 <u>ผลการทดลองจริง</u> การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด กรณีที่ 4: โหลดสลับจาก 250 W <--> 1,100 W	77
3-32 <u>ผลการทดลองจริง</u> การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด กรณีที่ 5: โหลดสลับจาก 150 W <--> 1,200 W	78
3-33 การตอบสนองของแรงดันที่บัสไฟตรงต่อการสลับโหลด (stabilization) จาก 0 W ถึง 525 W	80

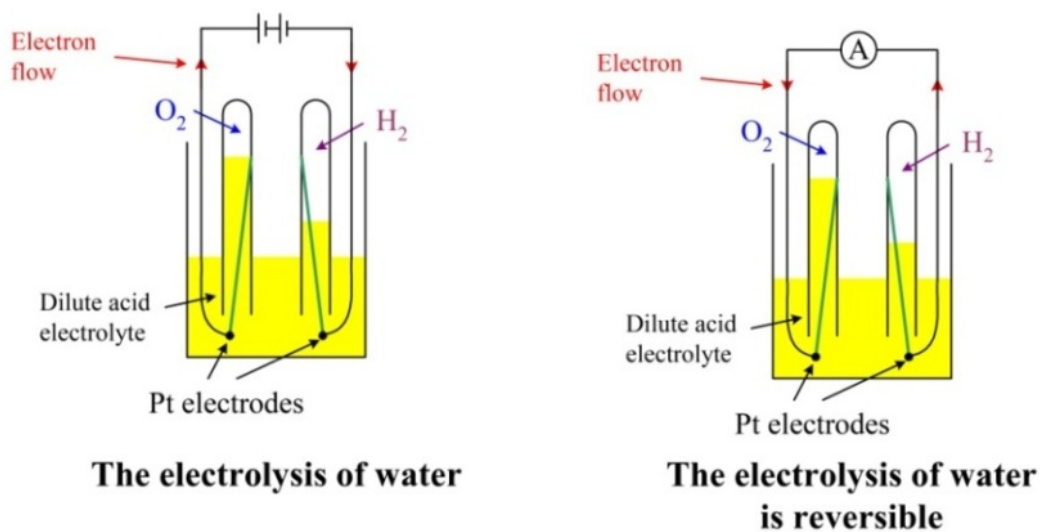


ในการทำการวิจัยเรื่องแหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่นั้น มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 1.1 เซลล์เชื้อเพลิง
- 1.2 เซลล์แสงอาทิตย์
- 1.3 กังหันลม
- 1.4 แบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์
- 1.5 การขนานตัวแปลงไฟที่มีการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส
- 1.6 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)

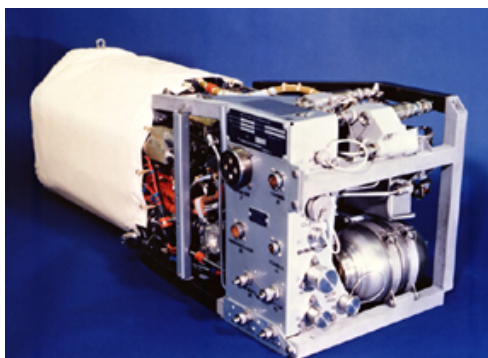
### 1.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกคิดค้นและทดลองครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1838 โดย Sir William Robert Grove ศาสตราจารย์สาขาปรัชญาการทดลองที่ The Royal Institution ในกรุงลอนดอน [1] จนทุกวันนี้เขาเป็นที่รู้จัก ในฐานะบิดาแห่งเซลล์เชื้อเพลิง การทดลองของเขาเรื่องขบวนการอิเล็กโทรไลต์ (Electrolysis) โดยใช้กระแสไฟฟ้าแยกน้ำให้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นำมาซึ่งการกล่าวถึงอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งเป็นครั้งแรก ต่อมาเรียกว่า “เซลล์เชื้อเพลิง” (Fuel Cell) เขาให้สมมุติฐานว่าน่าจะเป็นไปได้ในการแปลงย้อนกลับขั้นตอนขบวนการอิเล็กโทรไลต์ โดยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนและเพื่อที่จะทดสอบทฤษฎีนี้ เขาได้วางแผ่นแพลตินัม (Platinum) 2 แผ่น ไว้ในขวดที่ปิดแยกกัน ขวดหนึ่งมีไฮโดรเจนและอีกขวดมีออกซิเจน เมื่อขวดสองอันนี้ถูกจุ่มรวมกันด้วยกรดซัลฟูริกเจือจางทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองและเกิดน้ำขึ้นในขวดที่บรรจุก๊าซทั้งสอง ดังแสดงในภาพที่ 1-1 เพื่อที่จะเพิ่มแรงดันต่ำที่ผลิตออกมานั้น เขาได้ต่ออุปกรณ์เหล่านี้แบบอนุกรมกันและเขาได้เรียกอุปกรณ์นี้ในขณะนั้นว่า “ก๊าซแบตเตอรี่” ซึ่งเป็นต้นแบบของเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบัน



ภาพที่ 1-1 แนวคิดเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบที่คิดค้นโดย Sir William Robert Grove

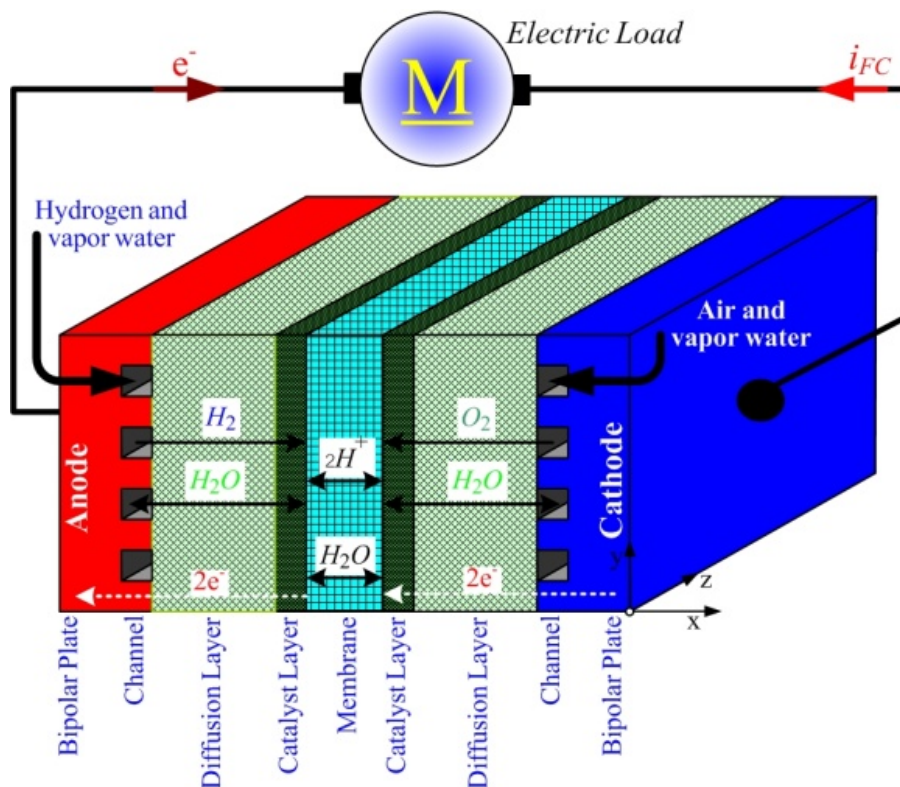
เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์แปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่ก่อกมลพิษ พลังงาน (อิเล็กทรอนิกส์) จะถูกส่งออกมาเมื่อเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) ทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศและทำให้เกิดน้ำบริสุทธิ์และความร้อนควบคู่ตามมา ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้เกิดขึ้นและพลังงานถูกส่งออกมาในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าคือไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต่ำพร้อมกับความร้อน เซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงและสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ที่ใช้งาน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่มีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการผลิต และมีขนาดเล็กคือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (Polymer Electrolyte Membrane: PEMFC) [2] ผลิตเป็นครั้งแรกโดยบริษัท General Electric (GE) และถูกนำไปใช้โดยองค์การอวกาศนาซา ในปีช่วงปี ค.ศ. 1960 ในส่วนหนึ่งของโครงการอวกาศเจอร์มินี่ (Gemini space program) ดังแสดงในภาพที่ 1-2 ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้กำลังถูกนำไปใช้งานมากขึ้นในรถยนต์และรถไฟเพราะมีน้ำหนักเบาและทำงานที่อุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 1-2 เซลล์เชื้อเพลิง 12 kW สำหรับสถานีอวกาศของนาซา

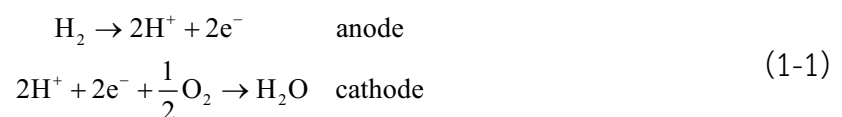
### 1.1.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แสดงในภาพที่ 1-3 [3] ก๊าซซึ่งไหลมาตามทิศทาง  $x$  มาจากช่องที่ถูกออกแบบเป็นแผ่นแบบสองขั้ว (หนา 1-10 mm) ไอน้ำถูกนำมารวมกับก๊าซเพื่อให้ ความชื้นกับเมมเบรน ชั้นการกระจายตัว (diffusion layers: 100-500  $\mu\text{m}$ ) มีไว้เพื่อการ แพร่กระจายที่ดีที่สุดของก๊าซไปยังชั้นปฏิกิริยา (reaction layers : 5-50  $\mu\text{m}$ ) ชั้นเหล่านี้ได้ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าของเซลล์ซึ่งทำด้วยแพลตินัมทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 1-3 ชั้นต่างๆ ของเซลล์พื้นฐานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

การทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนและออกซิเจนคือ



ถูกแยกจากกันโดยเมมเบรน (20-200  $\mu\text{m}$ ) ซึ่งนำโปรตอนจากขั้วแอโนด (Anode) ไปขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งอิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ การเคลื่อนที่ของโปรตอนนี้ได้ดึงโมเลกุลของ น้ำมาด้วยทำให้เกิดการกระจายของความชื้นในเมมเบรน โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่กระจายไป ได้ทั้งสองทิศทางภายในเมมเบรนตามฝั่งที่ก๊าซมีความชื้นมากและตามความหนาแน่นของ

กระแสไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กันโดยตรงกับการไหลของโปรตอนผ่านเมมเบรนและโดยตรงกับการปริมาณน้ำที่ผลิตในฝั่งแคโทด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในฝั่งแอโนดนั้นไม่สามารถผ่านเมมเบรนและได้ถูกใช้ในวงจรไฟฟ้าภายนอกเช่น มอเตอร์ หลอดไฟ อื่นๆ ก่อนย้อนกลับสู่แคโทด การไหลของอิเล็กตรอนหรือเรียกว่ากระแสไฟฟ้านั้นสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

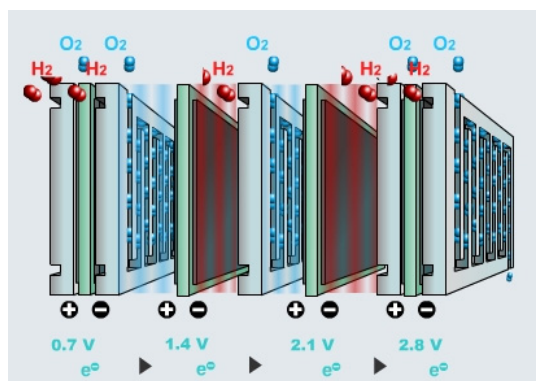
$$J_{H^+} = \frac{i}{F} \quad (1-2)$$

$F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday)

ค่าแรงดันเอาต์พุตของเซลล์หนึ่งเซลล์มาจากพลังงานปลดปล่อยอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy  $\Delta G$ ) คือ

$$V_{rev} = -\frac{\Delta G}{2F} = 1.23 \text{ V} \quad (1-3)$$

ซึ่งแรงดันนี้ไม่เคยได้ถึงค่าทางทฤษฎี แม้กระทั่งในสภาพที่ไม่มีโหลด แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ที่พิกัดกระแส (ประมาณ  $0.5 \text{ A.cm}^{-2}$ ) มีค่าประมาณ  $0.6 - 0.7 \text{ V}$  ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างโดยนำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน โดยประกอบเป็นชั้นๆ ดังภาพที่ 1-4 เพื่อที่จะเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น

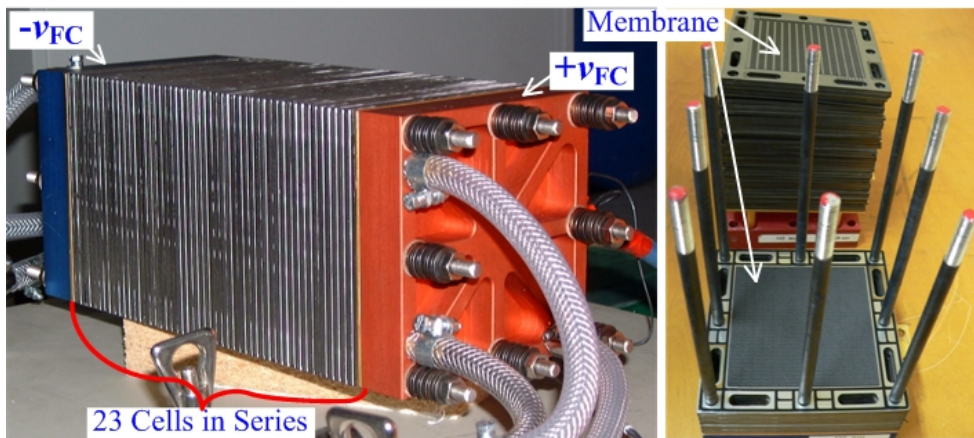


ภาพที่ 1-4 การต่อเซลล์แบบอนุกรมของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มแรงดัน

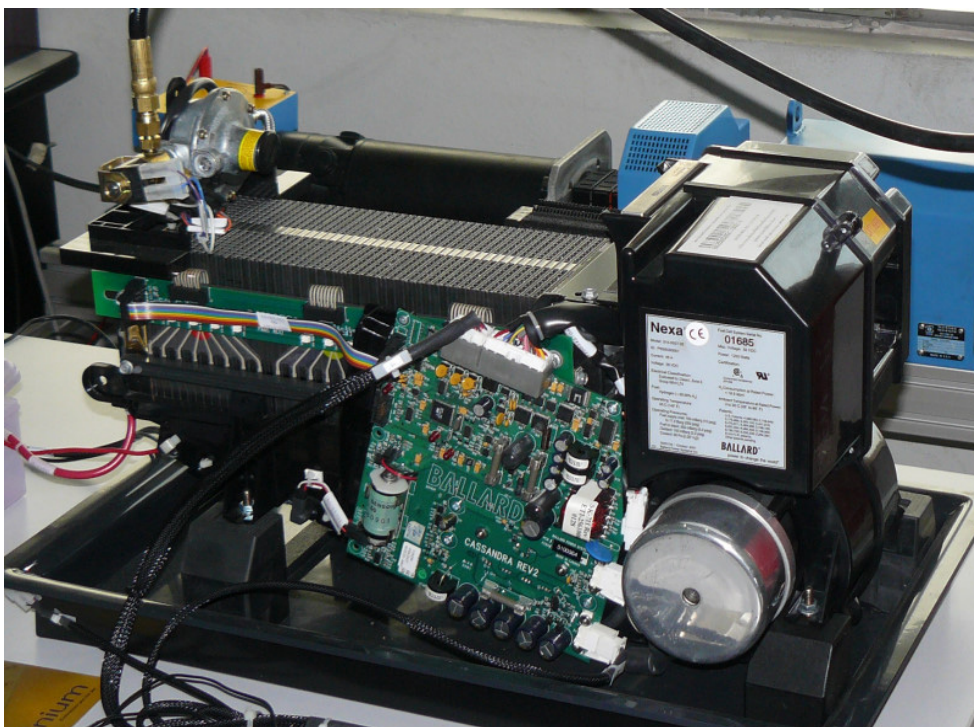
ตัวอย่างการอนุกรมเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 23 เซลล์ต่ออนุกรม ขนาด  $500 \text{ W}$ ,  $40 \text{ A}$  ประมาณ  $13 \text{ V}$  ออกแบบและผลิตโดย Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg (ZSW) ประเทศเยอรมัน เซลล์เชื้อเพลิงนี้ปัจจุบันถูกนำไปใช้ในงานวิจัยที่



Nancy Research Group in Electrical Engineering (GREEN) ประเทศฝรั่งเศส ดังแสดงในภาพที่ 1-5 และเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 47 เซลล์ต่ออนุกรมขนาด 1200 W, 46 A ประมาณ 26 V (น้ำหนัก: 13 กิโลกรัม ขนาดความยาว: 56 เซนติเมตร กว้าง: 25 เซนติเมตร สูง: 33 เซนติเมตร) ออกแบบและผลิตโดย Ballard Power System ประเทศแคนาดา เซลล์เชื้อเพลิงนี้ปัจจุบันถูกนำไปใช้ในงานวิจัยที่สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ดังแสดงในภาพที่ 1-6



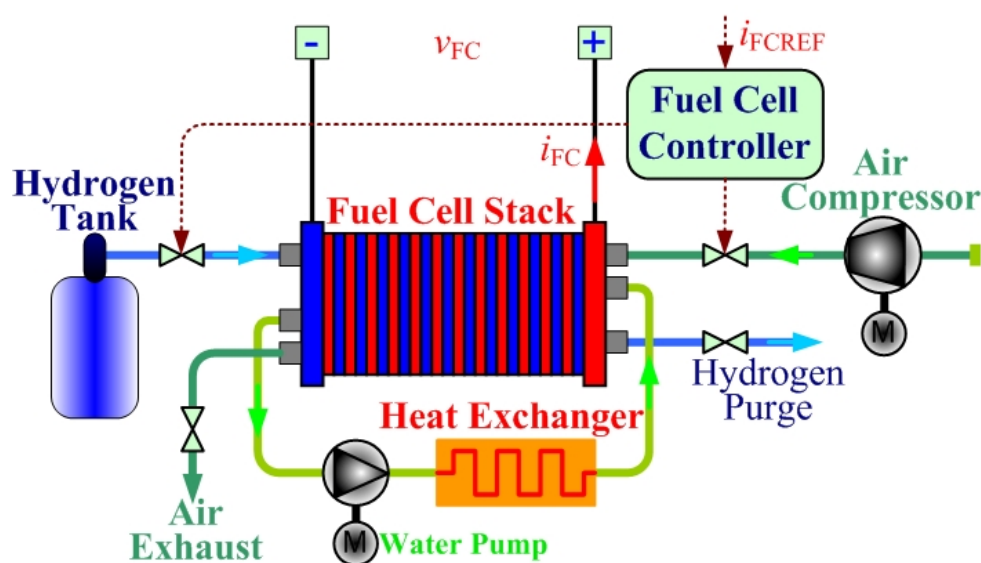
ภาพที่ 1-5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 23 เซลล์ต่ออนุกรม



ภาพที่ 1-6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 47 เซลล์ต่ออนุกรม

### 1.1.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีความจำเป็นในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [4], [5] เช่น การป้อนก๊าซและการระบายความร้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นระบบเซลล์เชื้อเพลิงจึงประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ภาพที่ 1-7 แสดงระบบอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ประกอบด้วยถังไฮโดรเจน ตัวควบคุมความชื้นวาล์ว ตัวระบายและแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่ง  $v_{FC}$  คือแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง  $i_{FC}$  คือกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง  $i_{FCREF}$  คือกระแสอ้างอิงของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อควบคุมการจ่ายไฮโดรเจนและอากาศ

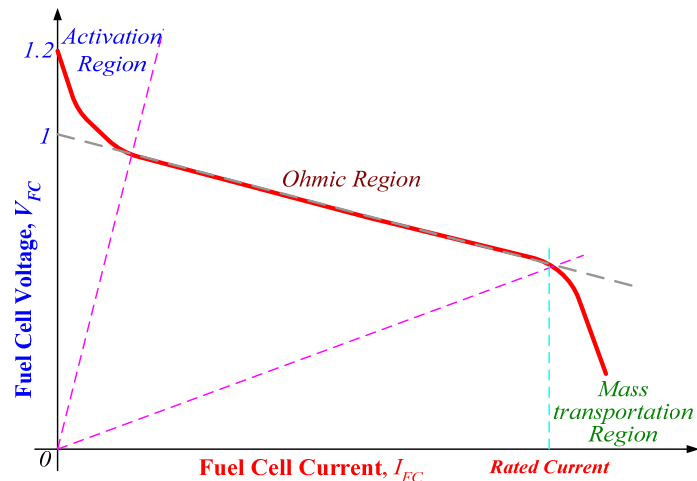


ภาพที่ 1-7 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

ภาพที่ 1-8 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า [6] กราฟที่ได้ประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ

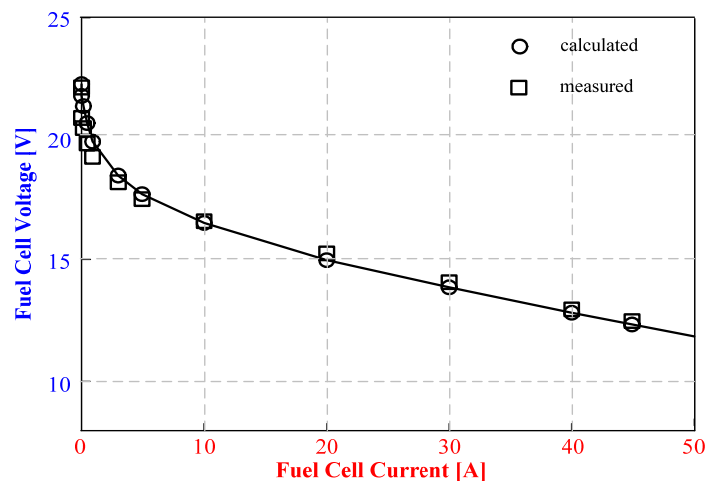
- ปรากฏการณ์กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเชิงเส้นที่แรงดันตก มีสาเหตุจากความต้านทานภายใน
- ส่วนสุดท้ายคือพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด กลายเป็น

ปัจจัยจำกัดทำให้แรงดันตกอย่างมาก



ภาพที่ 1-8 กราฟแรงดันต่อกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ชนิด PEM

ภาพที่ 1-9 แสดงการเปรียบเทียบผลทดลองกับผลคำนวณที่ได้จากตัวแปรต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง (ดังแสดงในภาพที่ 1-5) จะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงคือ 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกจาก 23 V ที่ไม่มีโหลดเป็น 13 V ที่พิกัดกำลัง 500 W



ภาพที่ 1-9 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W

## 1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (หรือโซลาร์เซลล์)

### 1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่นซิลิคอน (Silicon) แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็น

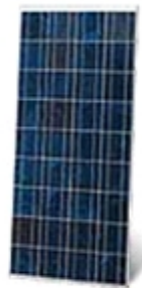
ตัน ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้าและจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

### 1.2.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

แบ่งตามวัสดุที่ใช้เป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ



Single Crystalline Silicon Solar Cell



Polycrystalline Silicon Solar Cell



Amorphous Silicon Solar Cell

ภาพที่ 1-10 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

- Single Crystalline Silicon Solar Cell เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก

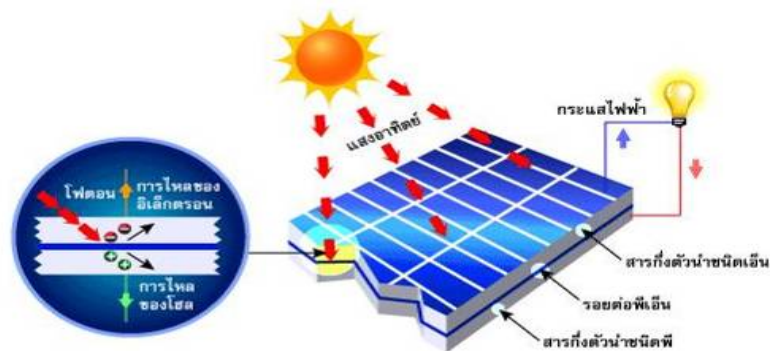
- Polycrystalline Silicon Solar Cell เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มิลลิเมตร) น้ำหนักเบาและประสิทธิภาพเพียง 5-10 เปอร์เซ็นต์

- Amorphous Silicon Solar Cell เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก สารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียม อาร์เซไนด์ แคดเมียม เทลเลอไรด์ และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25 เปอร์เซ็นต์

### 1.2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

มีลักษณะโครงสร้างแบบรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอนจึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถูและผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัสจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ เมื่อเติมสารเจือโบรอนจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มิลลิเมตร) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่ได้รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

### 1.2.4 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

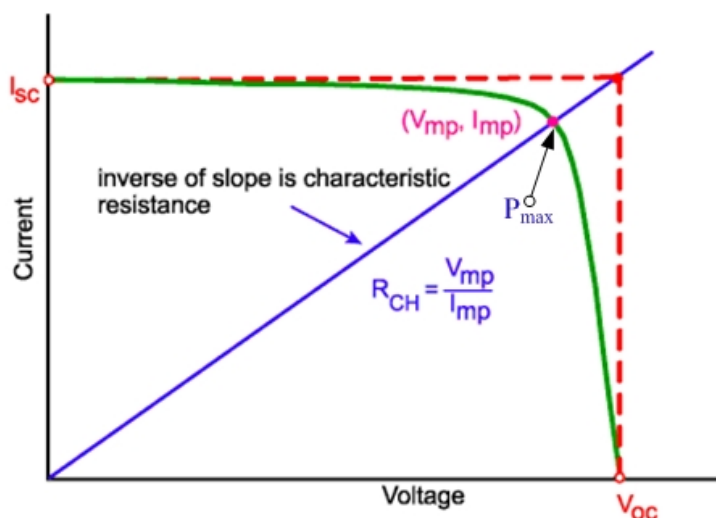


ภาพที่ 1-11 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและประจุบวกขึ้น ได้แก่อิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างรอยต่อของสารพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าขึ้นภายในเซลล์เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว เมื่อต่อครบวงจรจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น

### 1.2.5 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกระแสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันจะค่อย ๆ ลดลงจนถึง 0 V ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถจ่ายแรงดันคงที่ได้ จึงต้องใช้การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในช่วงค่าแรงดันไม่ต่ำมากเกินไป โดยจะมีจุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้สูงสุด ( $P_{Max}$ ) ดังภาพที่ 1-12 แสดงกราฟลักษณะสมบัติการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะจ่ายกระแสและแรงดันให้กับโหลด โดยจะมีจุดที่ทำให้สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงสุดที่จุด  $P_{max}$



ภาพที่ 1-12 กราฟลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

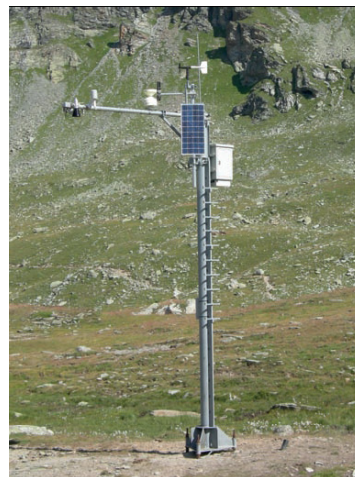
### 1.2.6 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ มี 4 ระบบใช้งานดังนี้ [7]

1.2.6.1 ระบบจ่ายไฟสำหรับที่พักอาศัยที่เป็นอิสระ (Off-grid domestic) ระบบนี้จ่ายไฟสำหรับให้บ้านเรือนและหมู่บ้าน ระบบไฟฟ้านี้ไม่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า โดยเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าสำหรับแสงสว่าง ตู้เย็นและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่กำลังต่ำๆ และจากข้อมูลหลายๆ ประเทศที่มีระบบจ่ายไฟแบบนี้ จะมีกำลังไฟฟ้าอยู่ประมาณ 1000 W และเป็นทางเลือกทางหนึ่งในการประหยัดและช่วยระบบจ่ายไฟหลักสำหรับบ้านหรือหมู่บ้านที่อยู่ห่างจากระบบจ่ายไฟหลักมากกว่า 1 ถึง 2 กิโลเมตร ในภาพที่ 1-13 แสดงตัวอย่างการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับที่พักอาศัยที่เกาะง่าม หมู่เกาะช้าง จังหวัดตราด โดยไม่ต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้าขนาด 2.5 kW โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเอกรัฐโซล่า



ภาพที่ 1-13 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับที่พักอาศัยที่เกาะง่าม จังหวัดตราด

1.2.6.2 ระบบจ่ายไฟสำหรับไม่ใช่ที่พักอาศัยที่ไม่ต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้า (Off-grid non-domestic) ระบบจ่ายไฟแบบนี้ถือได้ว่าเป็นงานที่มีการประยุกต์ใช้งานแรกทางด้านการค้าที่ใช้งานบนโลก เพราะเดิมทีนั้นระบบจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีใช้งานมานานแล้วในยานหรือกระสวยอวกาศ มีงานจำนวนมากที่ต้องการระบบจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ เช่น ระบบสื่อสาร ป้อนน้ำ ตู้แช่วัคซีน หรือระบบนำร่อง งานเหล่านี้ไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมากนัก แต่มีความจำเป็นต้องการกำลังไฟฟ้าจ่ายไฟเลี้ยงระบบ ทำให้ราคากระบบจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นี้สามารถแข่งขันกับระบบจ่ายไฟกำลังต่ำด้วยแหล่งจ่ายอื่นได้ ซึ่งภาพที่ 1-14 แสดงระบบไฟเลี้ยงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนำร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์



ภาพที่ 1-14 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนำร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์

1.2.6.3 ระบบจ่ายไฟที่ต่อเข้ากับระบบ (Grid Connected) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ถูกติดตั้งเพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบให้ผู้บริโภคหรือต่อโดยตรงเข้ากับระบบไฟของการไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ของระบบไฟฟ้าที่มีวงพื้นที่จำกัดผู้บริโภคแทนที่จะเป็นระบบจ่ายไฟขนาดใหญ่

ขนาดของระบบนี้ไม่เป็นที่แน่นอน อาจจะมีขนาดถึง 1 MW ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านพักอาศัย ซึ่งในภาพที่ 1-15 แสดงระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected) ที่โรงงานของบริษัทเอกรัฐโซลาร์ ที่จังหวัดระยอง มีขนาด 8.28 kW โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเอกรัฐโซลาร์



ภาพที่ 1-15 ระบบโซลาร์เซลล์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected)

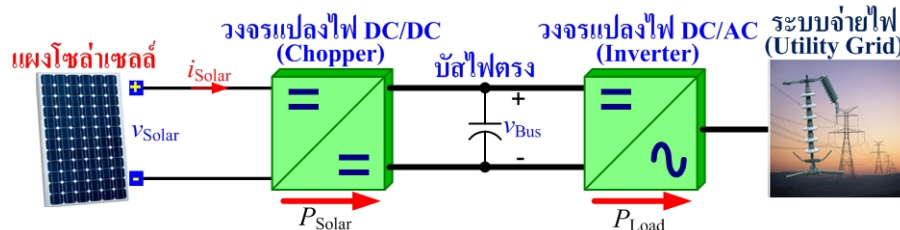
1.2.6.4 ระบบจ่ายไฟแบบศูนย์กลางที่ต่อเข้าระบบ (Grid Connected) ระบบนี้ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการจ่ายไฟหรือโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์หรือสนามเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าแบบนี้จะไม่จ่ายไฟให้กับกลุ่มผู้บริโภคกลุ่มใดโดยเฉพาะ เป็นการจ่ายไฟเข้าระบบใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 1-16 เป็นสนามเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก กำลังสร้างขึ้นที่รัฐออริโซนา ประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 280 MW ซึ่งจ่ายไฟสำหรับบ้านได้ 70,000 หลังคาเรือน



ภาพที่ 1-16 สนามเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก



เซลล์แสงอาทิตย์กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงดังนั้นมีความจำเป็นต้องแปลงระดับไฟตรงเป็นระดับไฟตรงที่ต้องการ ก่อนด้วยวงจรแปลงไฟที่เรียกว่า “ช็อปเปอร์” (DC/DC Converter) หลังจากนั้นจึงต้องมีตัวแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ เรียกว่า “อินเวอร์เตอร์” (Inverter, DC/AC Converter) จ่ายไฟฟ้าให้ผู้บริโภคหรือต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 1-17



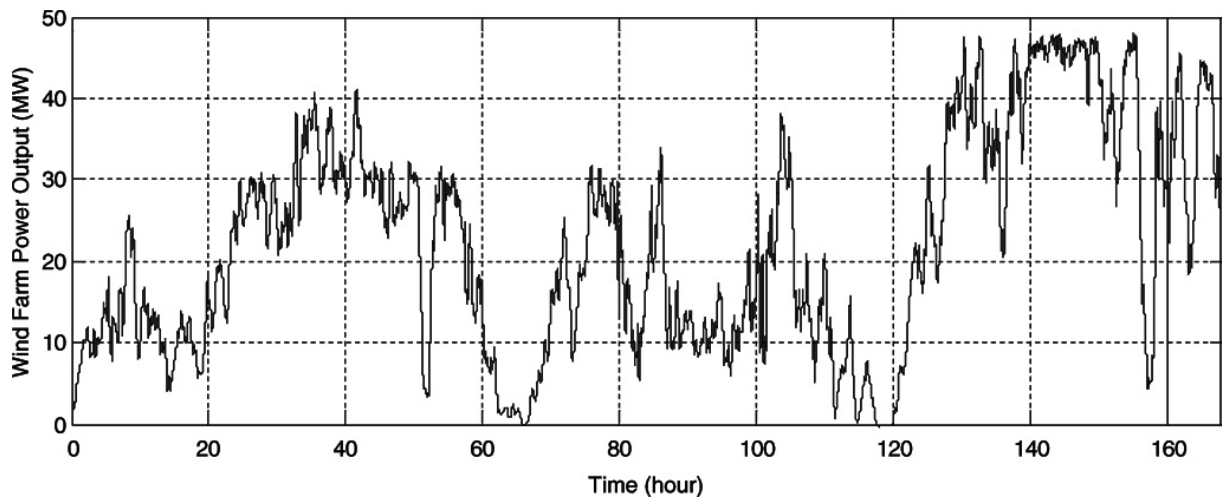
ภาพที่ 1-17 ระบบส่งจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

### 1.3 กังหันลม

ลมเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติทั่วโลกลมที่มักจะได้ยินชื่ออยู่บ่อยๆ ก็คือลมมรสุม ซึ่งหมายถึงลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางกับการเปลี่ยนฤดูคือฤดูร้อนจะพัดอยู่ในทิศทางหนึ่งและจะพัดเปลี่ยนทิศทางในทางตรงกันข้ามในฤดูหนาว นอกจากนี้ลมยังอาจเกิดขึ้นจากอิทธิพลของภูมิประเทศและความเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งเรียกลมชนิดนี้ว่าลมประจำถิ่น ซึ่งลมประจำถิ่นยังสามารถแบ่งออกเป็นลมบกและลมทะเล ลมภูเขาและลมหุบเขา นอกจากนี้ในประเทศไทยยังมีลมประจำถิ่นที่เป็นที่รู้จักกันดีคือลมตะเภาและลมว่าว

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่า ลมผิวพื้น หมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตร เหนือพื้นดินเป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้าของอากาศและมีแรงฝัดอันเกิดจากการปะทะกับสิ่งกีดขวางร่วมกระทำด้วยในระดับต่ำ แต่ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไปแรงต้านจะลดลงและความเร็วลมจะเพิ่มขึ้น ส่วนที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตร เกือบไม่มีแรงฝัด ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระดับความสูงและสภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกันกับทิศทางของลมจากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่ากังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่ดีนั้นก็ขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ความเร็วลมเท่าๆ กันแต่มีทิศทางลมที่แตกต่างกันเมื่อพุ่งเข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลมเป็นอย่างมากผลคือแรงผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากกังหันลมแตกต่างกัน

ในภาพที่ 3-18 แสดงกราฟกำลังงานที่ได้จากสนามกังหันลม (Wind Farm) ขนาดใหญ่ขนาด 50 MW [8] มันแสดงให้เห็นว่ากำลังที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละวันจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ดังนั้นกังหันลมไม่สามารถใช้งานเป็นแหล่งจ่ายเดี่ยวๆ ได้ เช่นเดียวกับโซลาร์เซลล์ ที่ต้องการแบตเตอรี่หรือซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในการช่วยจ่ายไฟเพื่อควมมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบ



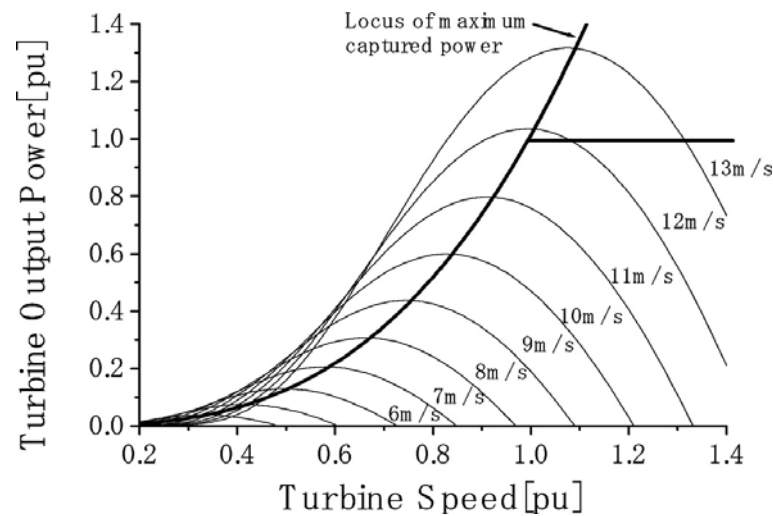
ภาพที่ 1-18 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม

กำลังที่ได้จากกังหันลม  $P_{WD}$  สามารถแสดงได้ดังนี้ [9]

$$P_{WD} = 0.5 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\omega}^3 \cdot C_P(\lambda, \beta) \quad (1-4)$$

ซึ่ง  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )  $R$  คือรัศมีของใบพัด (m)  $V_{\omega}$  คือความเร็วลม (m/s)  $C_P$  คือสัมประสิทธิ์กำลังงาน ที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วทิว ( $\lambda$ ) กับมุมของใบพัด ( $\beta$ )

จากสมการที่ (1-4) สามารถเขียนกราฟลักษณะสมบัติของกังหันลมได้ดังภาพที่ 1-19 จะเห็นว่าที่ความเร็วต่างกันกราฟจะมีความแตกต่างกัน และค่ากำลังสูงสุดก็จะแตกต่างกัน เหมือนกับโซลาร์เซลล์ ที่กังหันลมต้องการตัวคำนวณหาจุดที่กำลังสูงสุด MPPT ระบบจะต้องไม่ดึงกำลังเกินกว่าที่กังหันลมจ่ายกำลังได้สูงสุด ไม่งั้นระบบจะทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 1-19 กราฟลักษณะสมบัติของกังหันลม

#### 1.4 แบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์

ตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 90 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่สำหรับนำไปใช้กับงานกำลังไฟฟ้าที่สูงได้เริ่มถูกผลิตขึ้น [10] หน่วยความจุของคาปาซิเตอร์จะมีหน่วย ฟาราดี (Farads) ปัจจุบันความจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าสูงมากถึงเป็น “พันฟาราดี” โดยมีระดับความจุของพลังงานที่ประมาณ  $5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  ซึ่งมีความจุเป็นล้านเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ (เป็นคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์) แต่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์หนึ่งเซลล์จะทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้น้อยไม่เกิน 3 V นอกจากนี้กระบวนการทางไฟฟ้าสถิตของอุปกรณ์ชนิดนี้คือพยายามลดค่าความต้านทานภายในให้น้อยที่สุด ทำให้ได้ระดับกำลังงาน  $\text{kW} \cdot \text{kg}^{-1}$  ที่สูง ในปริมาณมากกว่า 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่แบบตะกั่ว [11]

ส่วนประกอบที่ใหม่ของอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดนี้ ช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างคาปาซิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์กับแบตเตอรี่แบบเดิม และยังทำให้เกิดการจัดการพลังงานไฟฟ้าในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบผสม แหล่งจ่ายแบบนี้จะใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งพลังงานสำรองควบคู่ไปกับแหล่งจ่ายพลังงานหลัก จากหลักการดังกล่าวจะรวมเอาข้อดีของเทคโนโลยีในการเก็บสะสมพลังงานคือระดับปริมาณพลังงาน และกำลังไฟฟ้าที่มีมากพอสำหรับการใช้งานที่ยาวนาน อีกทั้งลดปริมาตรและน้ำหนักของแหล่งจ่ายให้น้อยที่สุด ภาพที่ 1-20 แสดงรถยนต์ไฮโดรเจน (รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิง) ต้นแบบที่มีซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับระบบ



ภาพที่ 1-20 แนวคิดรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต

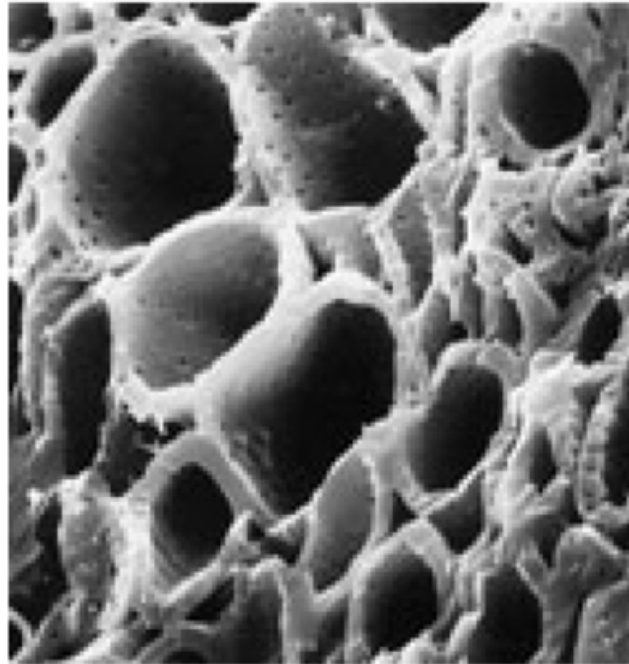
#### 1.4.1 หลักการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์

เป็นหลักการพื้นฐานของคาปาซิเตอร์แบบประจุไฟฟ้า 2 ชั้น (Electric Double-Layer) จากคุณสมบัติประจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าชนิดแข็งกับตัวนำประจุไฟฟ้าของเหลว คุณสมบัตินี้ ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1853 โดย Helmholtz (นักวิทยาศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่และผู้คิดสูตรทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ ในศตวรรษที่ 19) การเก็บพลังงานได้จากพื้นที่ถ่ายเทประจุระหว่างของแข็งกับของเหลวภายใต้ไฟฟ้าสถิต จากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้พื้นที่ถ่ายเทประจุนี้เรียกว่าประจุไฟฟ้า 2 ชั้น มีความหนาจำกัดในระดับนาโนเมตร ตามหลักฟิสิกส์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ก็คือตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) ที่รู้จักกันทั่วไป การเก็บสะสมพลังงานใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต ไม่ใช่แบบไฟฟ้าเคมีที่ใช้กับแบตเตอรี่จึงทำให้ศักยภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์สูงขึ้น วัสดุไดอิเล็กทริกส์ ประกอบด้วยโมเลกุลความเข้มสูง อย่างแรกทำให้มีค่าความจุที่สูง (ระหว่าง  $10 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$  ถึง  $30 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) แต่ทนแรงดันได้ต่ำ (ประมาณ 2.5 V สำหรับสารละลายชนิดอแกนิก (organic solvent)) เนื่องจากถูกจำกัดด้วยการแยกตัวของสารละลาย

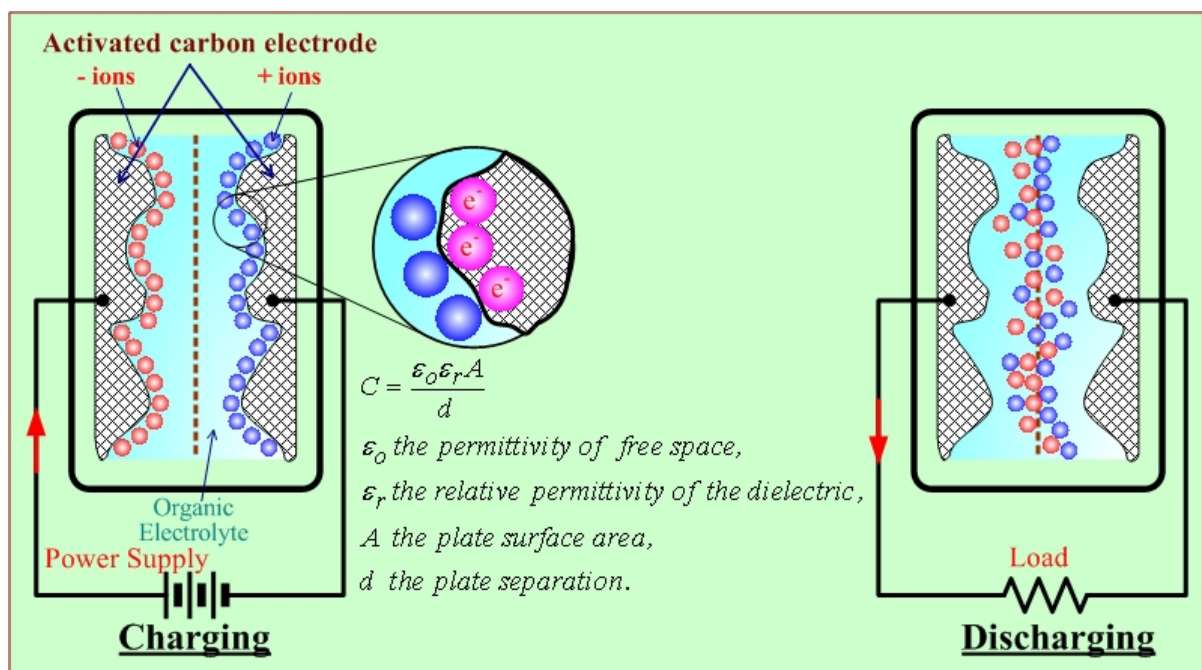
เพื่อรักษาข้อดีของหลักการประจุไฟฟ้า 2 ชั้นในด้านพลังงานและความจุไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ โดยไม่เพิ่มปริมาตรมากเกินไปเพื่อให้ได้ตามจุดประสงค์นี้ จึงมีการใช้วัสดุอิเล็กโทรดแบบมีพรong ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก เทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดโดยการใช้แอคทีฟคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 1-21 ที่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีมากกว่า  $1000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  จนถึง  $3000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  และทำให้ได้ความจุสูงหลายร้อยฟาราดส์ ต่อหนึ่งเซลล์ดังแสดงใน ภาพที่ 1-22 และ 1-23 ประกอบด้วย

- อิเล็กโทรด 2 ตัวชนิดคาร์บอนเป็นพรongแช่ในอิเล็กโทรไลต์

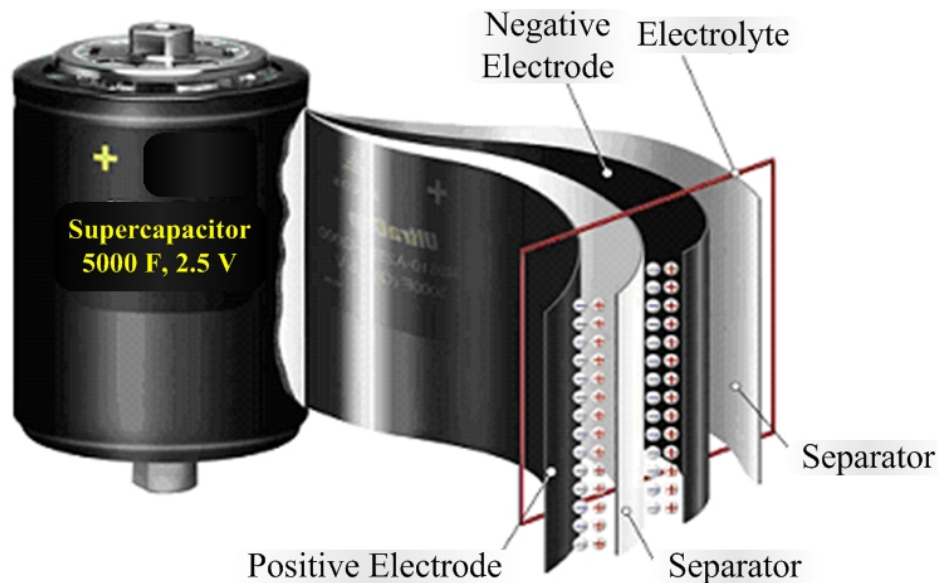
- เมมเบรนที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแต่เป็นตัวนำประจุระหว่างอิเล็กโทรด ป้องกันการลัดวงจร
- ขั้วต่อที่เป็นโลหะ โดยปกติเป็นอะลูมิเนียม



ภาพที่ 1-21 โครงสร้าง Microscopic ของวัสดุอิเล็กโทรดแบบ active carbon ในซูเปอร์คาปาซิเตอร์



ภาพที่ 1-22 หลักการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์



ภาพที่ 1-23 โครงสร้างของซูเปอร์คาปาซิเตอร์

#### 1.4.2 เทคโนโลยีซูเปอร์คาปาซิเตอร์

แนวคิดของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีมานานแล้ว ตั้งแต่การค้นพบหลักการของประจุไฟฟ้าแบบ 2 ชั้น (electric double layer) แต่อย่างไรก็ตาม สิทธิบัตรแรกเกี่ยวกับซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นของบริษัท General Electric ลงทะเบียนในปี ค.ศ. 1957 ผู้ประดิษฐ์ได้อธิบายการเก็บสะสมพลังงานโดยประจุไฟฟ้าแบบ 2 ชั้นที่ถูกพัฒนาจากการประสานระหว่างอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนแบบมีโพรงและอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว (กรดซัลฟูริก) ในปี ค.ศ. 1969 สิทธิบัตรอีกชิ้นจากบริษัท SOHIO ได้ทำการจดทะเบียนซึ่งได้อธิบายซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ทนแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าโดยใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เป็นของเหลว

เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้ถูกใช้งานอย่างประสบความสำเร็จ ที่เมืองโคลโลญน์ประเทศเยอรมันนีและล่าสุดได้มีการนำซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไปใช้ในงานรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่สำหรับระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรม ลิฟต์ และรถไฟฟ้า

แรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์  $v_C(t)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่รู้จักกันเป็นอย่างดี [12] คือ

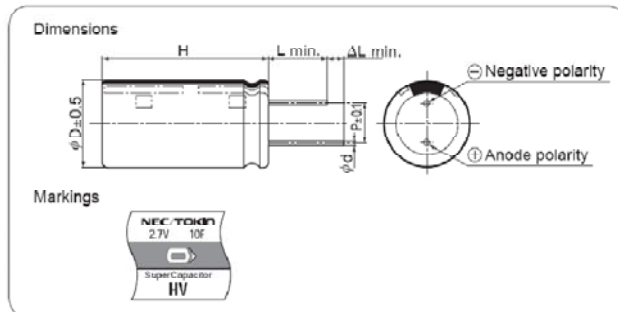
$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C(t) \cdot dt + v_C(t_0) \quad (1-5)$$

ซึ่ง  $i_C(t)$  คือกระแสชาร์จของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ [A]  $C$  คือค่าความจุ [F]

ขณะที่พลังงานที่เก็บสะสมในซูเปอร์คาปาซิเตอร์  $E_C(t)$  [Joule, J] ก็สามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐานคือ

$$E_C(t) = \frac{1}{2} C \cdot v_C^2(t) \quad (1-6)$$

ขณะที่งานการค้ำของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้เริ่มต้นเพียงไม่กี่ปี อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนและอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นแบบของเหลวและอแกนิกส่วนใหญ่ผลิตโดยบริษัท NEC และ Matsushita ซึ่งมีขนาดเล็ก (ค่าความจุต่ำประมาณ  $0.5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) สำหรับใช้ในทางด้านสัญญาณ เช่นหน่วยความจำสำรอง ตั้งแต่ต้นยุคปี ค.ศ. 1990 ภาพที่ 1-24 แสดงขนาดตัวอย่างซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กขนาด 2.7 V, 10 F, 22 F, 50 F และ 100 F ของบริษัท NEC และในภาพที่ 1-25 แสดงขนาดตัวอย่างซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กขนาด 24 V, 0.4 F ของบริษัท ABB ที่ผลิตจำหน่ายในปัจจุบัน



### Standard Rating

Part No.	Max. Rated Voltage (Vdc)	Nominal Capacitance (F)	Max. ESR (at 1 kHz) (mΩ)	Max. Current at 30 minutes (mA)	Dimensions (Unit: mm)						Weight (g)
					∅D	H	P	∅d	l	ΔL	
HV0E106N	2.7	10	500	8	10.0	35±2	5.0	0.6	15.0	5.0	4.5
HV0E226N	2.7	22	500	18	12.5	35±2	5.0	0.6	15.0	5.0	6.5
HV0E506N	2.7	50	100	40	18.0	40±5	7.5	0.8	15.0	5.0	14.0
HV0E107N	2.7	100	100	80	22.0	50±5	10.2	1.0	18.0	7.0	24.0

ภาพที่ 1-24 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กของบริษัท NEC



ภาพที่ 1-25 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็ก (24 V, 0.4 F, 5.7 kW)

ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง (มีค่าความจุเป็น kF มีระดับความหนาแน่นพลังงาน ( $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) และกำลังไฟฟ้า  $\text{kW}\cdot\text{kg}^{-1}$  ที่สูงมาก) ซึ่งสามารถหาซื้อได้ในปัจจุบัน ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์หนึ่งเซลล์จะมีแรงดันต่ำมาก ดังนั้นเมื่อนำไปต่อใช้งานจะนำมาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันและถ้าต้องการเพิ่มความจุก็จะนำมาต่อขนานกันได้อีก เป็นวิธีการเดียวกับแบตเตอรี่ ในภาพที่ 1-26 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT ขนาด 3500 F, 2.5 V, 500 A, 0.65 kg ภาพที่ 1-27 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน ( $292 \text{ F} = 3500/12$ ,  $30 \text{ V} = 2.5\times 12$ ) และภาพที่ 1-28 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน ( $32.4 \text{ F} = 3500/108$ ,  $270 \text{ V} = 2.5\times 108$ ) ภาพที่ 1-29 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell (เรียกว่า Booscap) 1 เซลล์ (รุ่น BCAP1200 P270: 1200 F, 2.7 V, 0.3 kg, 0.294 ลิตร) และโมดูลที่ BCAP1200 ต่ออนุกรมกัน 12 ตัว ( $100 \text{ F} = 1200/12$ ,  $32 \text{ V} = 2.7\times 12$ ) และภาพที่ 1-30 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าขนาด 29 F, 250 V, 45 kW, 53 kg เป็นซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell สำหรับงานสำรองไฟกำลังสูง ขณะที่ตารางที่ 1-1 เป็นตัวอย่างซุปเปอร์คาปาซิเตอร์แต่ละผู้ผลิตที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน



ภาพที่ 1-26 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT





ภาพที่ 1-27 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน



ภาพที่ 1-28 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน



ภาพที่ 1-29 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell (เรียกว่า Booscap) 1 เซลล์ และโมดูลที่ BCAP1200 ต่ออนุกรมกัน 12 ตัว



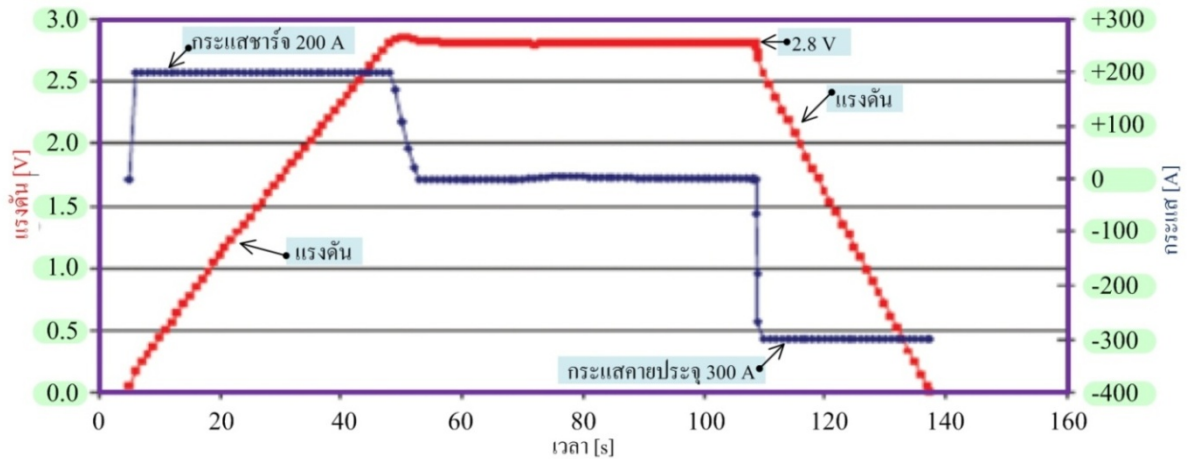
ภาพที่ 1-30 ชุดเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 1-1 ลักษณะสมบัติของชุดเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน

ผู้ผลิต	แรงดัน [V]	ความจุ [F]	ESR [mΩ]	Wh·kg <sup>-1</sup>	W·kg <sup>-1</sup>	น้ำหนัก [kg]	ปริมาตร [Litre]
Maxwell*	2.7	2800	.48	4.45	900	.475	.320
Apowercap**	2.7	590	.9	5.0	2618	.087	.062
Ness	2.7	1800	.55	3.6	975	.38	.277
Ness	2.7	5085	.24	4.3	958	.89	.712
Asahi Glass (PC)	2.7	1375	2.5	4.9	390	.210 (estimated)	.151
Panasonic (PC)	2.5	1200	1.0	2.3	514	.34	.245
LS Cable	2.8	3200	.25	3.7	1400	.63	.47
BatScap	2.7	2680	.20	4.2	2050	.50	.572
Power Sys. (PC)**	2.7	1350	1.5	4.9	650	.21	.151

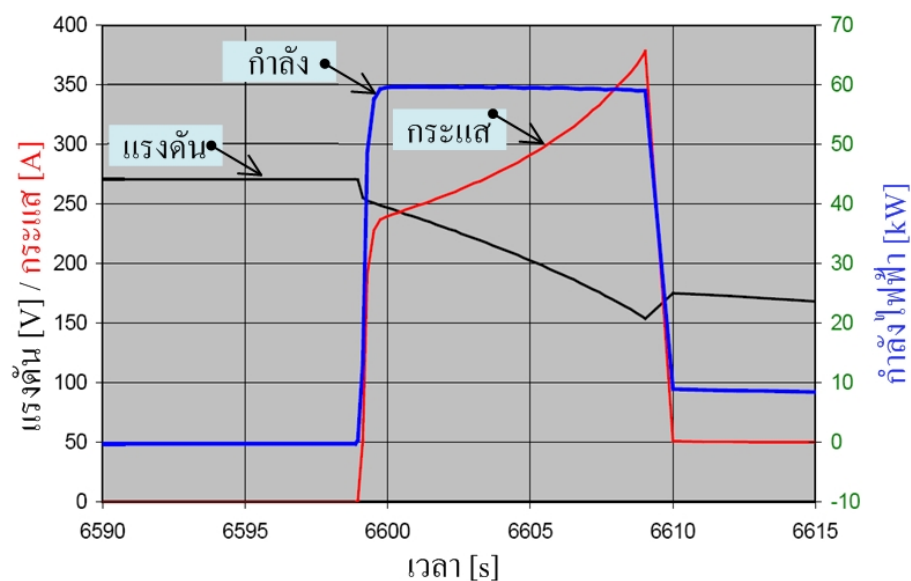
### 1.4.3 ลักษณะสมบัติของชุดเปอร์คาปาซิเตอร์

การนำชุดเปอร์คาปาซิเตอร์ไปใช้งานสำหรับเป็นระบบสำรองไฟช่วงสั้น ๆ แต่จะทำงานที่จ่ายกระแสหรือกำลังไฟฟ้าที่สูง ภาพที่ 1-31 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของชุดเปอร์คาปาซิเตอร์ ขณะทำการทดสอบชุดเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์ (2.8 V, 3200 F) ของ บริษัท LS Cable ขณะเก็บประจุที่กระแสคงที่ 200 A และคายประจุที่กระแส 300 A



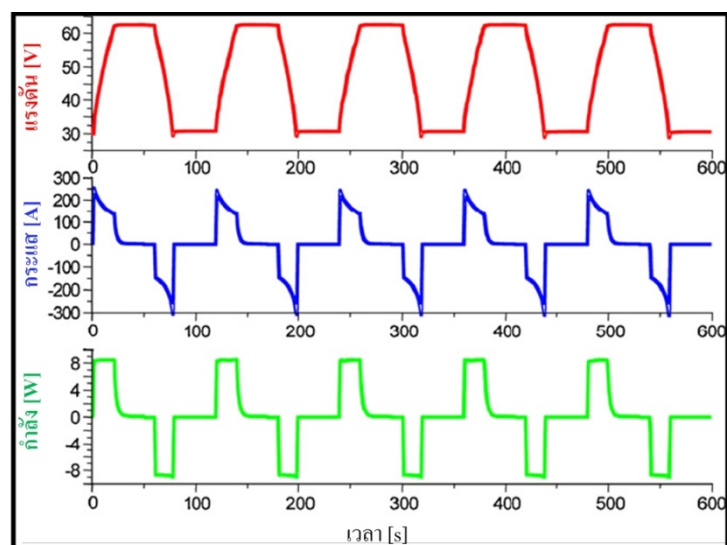
ภาพที่ 1-31 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์

ขณะที่ภาพที่ 1-32 แสดงสัญญาณแรงดัน กระแสและกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ขณะทำการทดสอบซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน (32.4 F, 270 V) ขณะจ่ายไฟที่กำลังไฟฟ้าคงที่ 60 kW ก่อนจ่ายไฟแรงดันซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โมดูลถูกชาร์จเต็มที่ 270 V หมายความว่ามีความเก็บสะสมในซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลอยู่ 1.2 MJ ที่เวลา 6598 วินาที ซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลถูกบังคับให้จ่ายกำลังไฟฟ้าที่คงที่ 60 kW จะสังเกตได้ว่าแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลลดลงเพราะมีการจ่ายพลังงานออกไปนั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (1-5) และสมการที่ (1-6) ทำให้กระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น (จ่ายกระแสมากขึ้น) เพราะกำลังไฟฟ้าคงที่



ภาพที่ 1-32 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว

การทดสอบสัญญาณแรงดัน กระแสและกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล เป็นการทดสอบรอบการชาร์จประจุและคายประจุที่กำลังไฟฟ้าคงที่ 20 kW ระยะเวลา 20 วินาที ทำให้แรงดันซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลเพิ่มขึ้นและลดลงอยู่ในช่วง 62.5 V ถึง 30 V จากการทดสอบทั้งหมดจะเห็นได้ว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถชาร์จและจ่ายไฟที่กำลังไฟสูงและรวดเร็ว ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่แบตเตอรี่ไม่สามารถทำงานได้ ทำให้เป็นจุดเด่นที่สำคัญของซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั่นเอง ภาพที่ 1-31 แสดงลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A 2600 F, 2.5 V ต่ออนุกรมกัน 25 ตัว ของบริษัท Maxwell



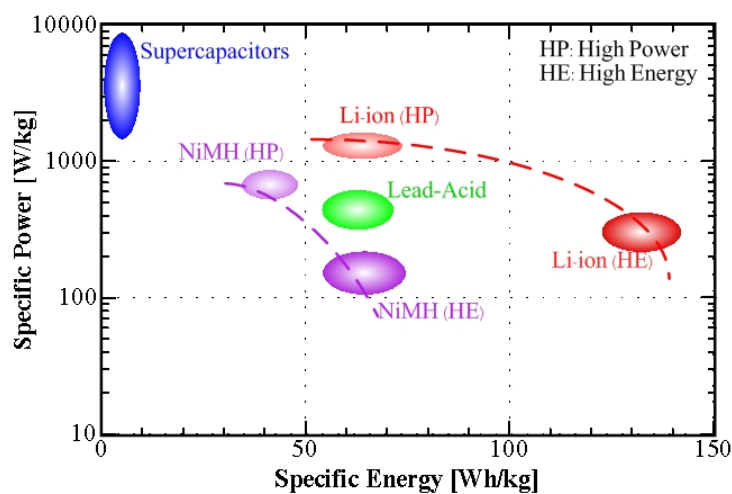
ภาพที่ 1-33 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A ของบริษัท Maxwell

#### 1.4.4 เปรียบเทียบแบตเตอรี่กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์

เนื่องจากแบตเตอรี่ต่างๆ ไปมีค่าความต้านทานภายในที่สูงกว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพในการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่า เพราะค่าความต้านทานภายในทำให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนนั่นเอง ดังนั้นในงานกำลังไฟสูงๆ ถ้าระบบสำรองไฟเป็นแบตเตอรี่จำเป็นต้องติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วย ทำให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้น เราสามารถสรุปประสิทธิภาพรอบการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าสูงกว่าอยู่ที่ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ [10], [11]

ยิ่งกว่านั้น จุดด้อยของแบตเตอรี่อีกอย่างคือใช้เวลาการชาร์จที่นานมาก ถูกจำกัดโดยปริมาณกระแสที่ชาร์จ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของตัวแบตเตอรี่เอง ขณะที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถชาร์จได้ที่กระแสสูงมากทำให้ชาร์จได้เร็วมาก ในภาพที่ 1-32

เปรียบเทียบพลังงานต่อน้ำหนัก ( $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) กับกำลังงานต่อน้ำหนัก ( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ของเทคโนโลยี ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเทียมไอออนและแบบนิเกิลเมททอลไฮไดรด์ จะเห็นได้ชัดว่าถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ จะมีพลังงานต่อน้ำหนัก ( $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ที่สูงกว่า ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์อยู่มากก็ตาม แต่ต้องไม่ลืมว่าซุปเปอร์ คาปาซิเตอร์สามารถจ่ายไฟได้เร็วมากเพราะมีค่าความต้านทานภายในที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ ขณะที่อายุการใช้งานของแบตเตอรี่แบบตะกั่วอยู่ที่ 1000 รอบ (Charge/Discharge Cycle) แต่ซุปเปอร์ คาปาซิเตอร์จะมีอายุการใช้งานที่นานมาก เราอาจจะประมาณได้ว่ามีอายุเป็นอนันต์ [13]



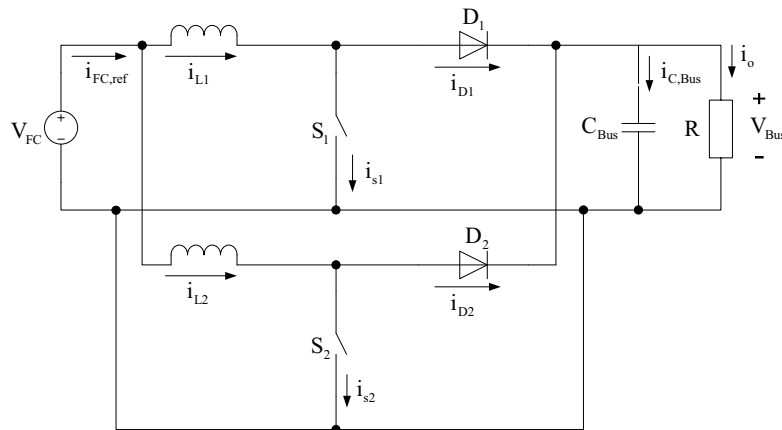
ภาพที่ 1-34 เปรียบเทียบพลังงานต่อน้ำหนัก ( $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) กับกำลังงานต่อน้ำหนัก ( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ของเทคโนโลยีซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเทียมไอออนและแบบนิเกิลเมททอลไฮไดรด์

### 1.5 การขนานตัวแปลงไฟที่มีการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส

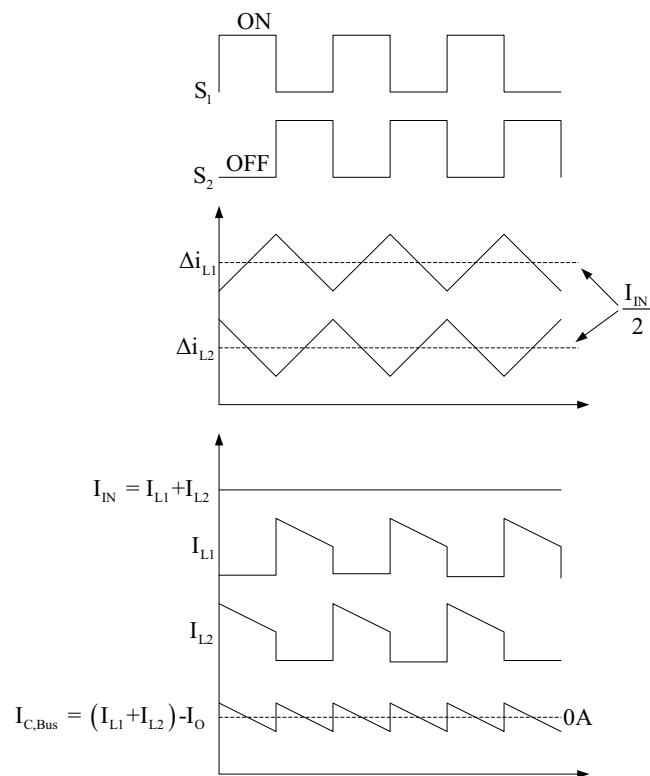
เทคนิคการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส (Interleaved Technique) สามารถทำได้โดยการนำเอาสัญญาณขั้วนำสวิตช์ของวงจรแปลงผันหลายๆ วงจรมาต่อขนานกัน แล้วกำหนดสัญญาณขั้วนำสวิตช์ให้เหลื่อมเวลาการทำงานกันออกไปเพื่อให้วงจรสลับการทำงานซึ่งกันและกันโดยจะแบ่งมุมการทำงานของสัญญาณขั้วนำสวิตช์ให้ทำงานให้ครบกันพอดีในแต่ละหนึ่งรอบเวลาการทำงาน ( $360/N$ ) [14], [15] ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนวงจร ( $N$ ) ที่นำมาต่อขนานกันและมีความถี่ของการสวิตช์เท่ากันและหลักการนี้จะทำให้แอมพลิจูดของกระแสเพื่อลดลงและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของความถี่กระแส โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียที่สวิตช์หรืออุปกรณ์ การนำวงจรแปลงผันแบบบัสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกันโดยใช้เทคนิคการเหลื่อมเฟส เพื่อเพิ่มความสามารถ

ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้นและลดค่าการกระเพื่อมของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำทำให้สามารถลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำลงได้

ตัวอย่างเช่นวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกัน 2 วงจร ดังในภาพที่ 1-35 โดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสอินพุตสูงโดยจัดให้มีเฟสของสัญญาณนำขับสวิตซ์ตัวบนและตัวล่างห่างกัน 180 องศา ซึ่งกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวกลับเฟสกัน 180 องศา และกระแสเอาต์พุตจะมีขนาดการกระเพื่อมลดลงครึ่งหนึ่ง ดังในภาพที่ 1-36

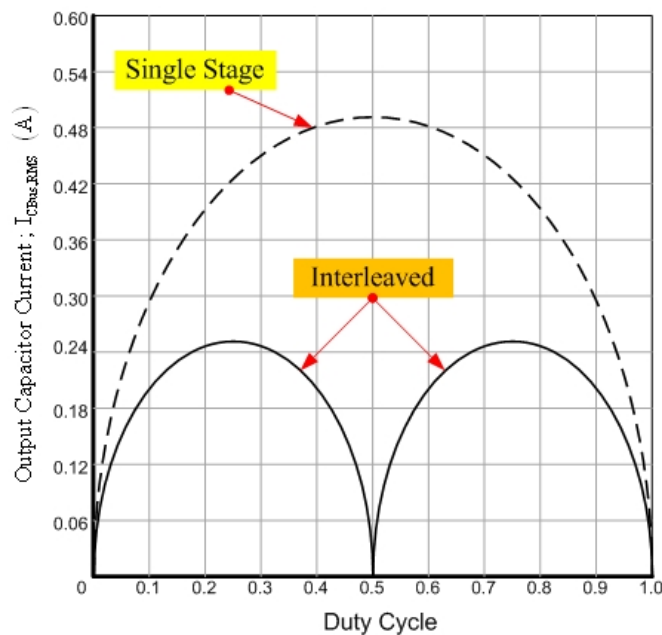


ภาพที่ 1-35 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกัน 2 วงจร



ภาพที่ 1-36 สัญญาณการสวิตซ์ที่ต่างเฟสกัน 180 องศา กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

จากคุณสมบัติของการเหลื่อมเฟสที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถนำค่าการกระเพื่อมของแต่ละวงจรมาทักล้างกันได้ (Ripple Cancellation) นั่นคือค่าการกระเพื่อมที่ด้านออกลดลงและขนาดค่าการกระเพื่อมจากการหักล้างกันของสองวงจรมีความสัมพันธ์กับวัฏจักรงานดังในภาพที่ 1-37 พบว่าค่าการกระเพื่อมถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์เมื่อวัฏจักรงานเป็น 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 1-37 กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ( $I_{CBus,RMS}$ ) กับวัฏจักรงานของวงจรแปลงผันที่มีการขนาน 2 วงจร

ดังนั้นการนำวงจรทบแรงดันมาต่อขนานกันหลายๆ ตัว เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นการนำวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์มาต่อขนานกันจนถึง  $N$  ตัว วิธีการนี้เรียกว่า Interleaved Technique วิธีการนี้เป็นการเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสทางด้านเอาต์พุตให้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมและมีข้อดีคือสามารถลดกระแสกระเพื่อมทางด้านอินพุตได้อีกด้วย วิธีการขนานวงจรทบแรงดันจะมีการแยกการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัวให้มีมุมต่างเฟสเพื่อที่สวิตช์จะไม่ทำงานพร้อมกัน สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{มุมในการสวิตช์} = \frac{2\pi}{N} \quad (\text{องศา})$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาต่อขนานกัน

จากสูตรการหามุมในการสวิตช์จะเห็นว่าเมื่อมีจำนวนวงจรต่อขนานมากขึ้นทำให้มุมจุดเริ่มต้นในการสวิตช์ก็น้อยลง เมื่อมีสวิตช์ที่นำกระแสมากขึ้นการกระเพื่อมของกระแสก็จะน้อยลงและกระแสก็จะไหลผ่านสวิตช์ทุกตัวที่ต่ออยู่ในวงจร ดังนั้นกระแสรวมทางด้านเอาต์พุตก็จะมากกว่าวงจรทบแรงดันปกติทั่วไปและกระแสกระเพื่อมยังน้อยลงด้วยนอกจากนี้วงจรทบแรงดันแบบหลายเฟสนี้ยังมีข้อดี [16], [17] คือ

- ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมีขนาดและจำนวนน้อยลง
- กระแสกระเพื่อม (Ripple Current) ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตน้อยลง
- ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานวงจรทบแรงดันนี้เป็นการเพิ่มความเชื่อมั่น ของระบบ (reliability) ให้เพิ่มมากขึ้นและยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการจ่ายพลังงาน ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ให้มากขึ้นโดยที่ไม่มีการขนานตัวอุปกรณ์เข้าไปในวงจร
- เมื่ออุปกรณ์ของแต่ละวงจรที่นำมาต่อขนานกันช่วยในการจ่ายกระแส ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์แต่ละวงจรก็น้อยลง ความร้อนที่เกิดขึ้นก็น้อยลงตามไปด้วย ทำให้ระบบการระบายความร้อนทำได้ง่ายเพราะความร้อนไม่สูงมาก
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละของวงจรจะช่วยในการจ่ายกระแสรวม ทำให้สามารถลดคุณสมบัติการทนกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวลงได้ทำให้ขนาดของอุปกรณ์เล็กลงได้และราคาก็ถูกลงด้วย

## 1.6 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)

ในปี ค.ศ. 1995 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบแฟลต (Flatness Theory) ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดยศาสตราจารย์ Fliess และผู้ร่วมวิจัย [18], [19] ในงานด้านสมการอนุพันธ์แบบพีชคณิต ระบบไม่เป็นเชิงเส้นจะแบน (Flat) ถ้าในระบบมีเซตของตัวแปรอิสระ (independent variables) เท่ากับจำนวนของตัวแปรอินพุต นั่นคือตัวแปรสเตต  $x$  และตัวแปรอินพุต (หรือตัวแปรควบคุม)  $u$  สามารถแสดงในเทอมของตัวแปรเอาต์พุต  $y$  และสามารถแสดงในเทอมการอนุพันธ์ที่จำกัด โดยที่ จะไม่ปรากฏสมการอนุพันธ์ในระบบอีกเลย เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้น พิจารณาระบบไดนามิกส์แบบไม่เชิงเส้นในรูปแบบต่างๆ ไปดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{y}(t) &= h(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$



โดยที่

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T; \quad \mathbf{x} \in \mathcal{R}^n \quad (1-8)$$

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T; \quad \mathbf{u} \in \mathcal{R}^m \quad (1-9)$$

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T; \quad \mathbf{y} \in \mathcal{R}^m \quad (1-10)$$

$f(\cdot)$  และ  $h(\cdot)$  คือฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ต่อเนื่อง (smooth nonlinear functions) และ  $(n, m) \in \mathbb{N}$  ยิ่งกว่านั้นเรากำหนดให้  $m \leq n$ .

ดังแสดงในภาพที่ 1-38 ระบบควบคุมแบบฟลัดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกเทียบเคียงคล้ายๆ กับระบบควบคุมที่สามารถควบคุมได้ในระบบเชิงเส้น ระบบจะแบนถ้าตัวแปรเอาต์พุต  $\mathbf{y}$  มีเงื่อนไขดังนี้

- ตัวแปรเอาต์พุต  $y_i$  สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรสแตต  $\mathbf{x}_i$  ตัวแปรอินพุต  $u_i$  และอนุพันธ์เทียบกับเวลาที่มีลำดับที่  $\alpha$

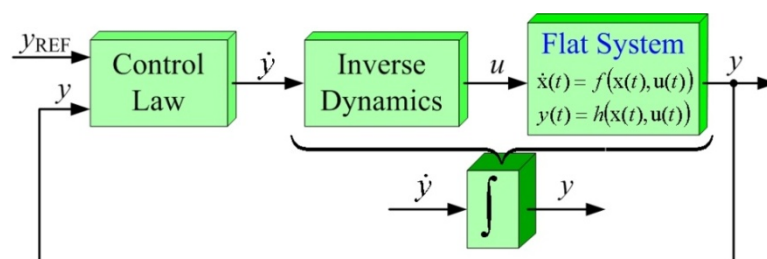
$$\mathbf{y} = \phi(\mathbf{x}, u, \dot{u}, \dots, u^{(\alpha)}) \quad (1-11)$$

- ตัวแปรสแตตทุกตัว  $\mathbf{x}_i$  และตัวแปรอินพุตทุกตัว  $u_i$  สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรเอาต์พุต  $y_i$  และอนุพันธ์เทียบกับเวลาที่มีลำดับที่  $\beta$

$$\mathbf{x} = \varphi(y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta)}) \quad (1-12)$$

$$\mathbf{u} = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta+1)}) \quad (1-13)$$

โดยที่  $\phi(\cdot)$ ,  $\varphi(\cdot)$ , และ  $\psi(\cdot)$  คือฟังก์ชันที่มีการแมบเป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 1-38 แนวคิดระบบควบคุมแบบฟลัด ซึ่ง  $y$  คือตัวแปรเอาต์พุต  $y_{REF}$  คือตัวแปรเอาต์พุตที่อ้างอิง  $u$  คือตัวแปรอินพุตที่ควบคุม

ถ้าตัวแปรเอาต์พุตที่เราสนใจถูกพิสูจน์ได้ว่ามีคุณสมบัติที่เป็นตัวแปรที่แบน  $y$  ตัวแปรเอาต์พุตที่เราอ้างอิง  $y_{REF}$  ก็จะตรงไปตรงมา โดนามิกส์ของค่าผิดพลาดสามารถคำนวณได้ โดยที่มีการกำเนิดสัญญาณตัวแปรอินพุตตัวใหม่  $v_i$  เกิดขึ้น (ดังภาพที่ 1-38) คือ

$$0 = (y_i^{(\beta+1)} - y_{i,REF}^{(\beta+1)}) + K_\beta (y_i^\beta - y_{i,REF}^\beta) + \dots + K_0 (y_i - y_{i,REF}) \quad (1-14)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} v_i &= y_{i,REF}^{(\beta+1)} + K_\beta (y_{i,REF}^\beta - y_i^\beta) + \dots + K_0 (y_{i,REF} - y_i) \\ &= y_i^{(\beta+1)} \end{aligned} \quad (1-15)$$

ซึ่ง  $K_\beta, \dots, K_0$  คือเซตของตัวแปรของตัวควบคุมและแทนตัวอนุพันธ์ที่สูงที่สุดของ  $y_i$  ในเทอมของตัวแปรอินพุตด้วย  $v_i$  ตามสมการที่ (1-13) ได้ผลลัพธ์ที่เราเรียกว่าอินเวอร์โดนามิกส์ (inverse dynamics) [20] คือ

$$\mathbf{u} = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^\beta, \mathbf{v}) \quad (1-16)$$

ที่ซึ่งตัวควบคุมอินพุตถูกคำนวณได้ โดยที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรเอาต์พุต  $y$  ที่ได้จากการวัดและตัวแปรเอาต์พุตที่เราอ้างอิง  $y_{REF}$  เซตของตัวแปรของตัวควบคุม  $K_\beta, \dots, K_0$  ถูกเลือกขึ้นอยู่กับตำแหน่งรากในระบบวงปิดที่เราต้องการ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$p(s) = s^{\beta+1} + \lambda_\beta s^\beta + \dots + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 \quad (1-17)$$

เห็นได้ชัดเจนว่า ค่าผิดพลาด  $e_i = y_i - y_{i,REF}$  แสดงได้ดังนี้

$$e_i^{(\beta+1)} + K_\beta e_i^{(\beta)} + \dots + K_0 e_i = 0 \quad (1-18)$$

ดังนั้น การเลือกค่าที่เหมาะสมของตัวแปรของตัวควบคุมกระทำได้โดยกำหนดตำแหน่งรากตามสมการลักษณะสมบัติ (Characteristic Equation)

