



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและ
แสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง

กรกฎาคม 2558

สัญญาเลขที่ RSA5580009

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและ
แสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยโครงการ “ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและแสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์” ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากทุน “ทุนเพิ่มขีดความสามารถด้านการวิจัยของอาจารย์รุ่นกลางในสถาบันอุดมศึกษา” (ทุนเมธีวิจัย สกว.) ประจำปีงบประมาณ 2555 ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่มีส่วนสำคัญในการผลักดันให้ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยดำเนินการวิจัยอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในส่วนที่เป็นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่และการสร้างทรัพยากรมนุษย์ในระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนการสร้างผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติและการสร้างต้นแบบโรงไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก ซึ่งมีประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศในอนาคตด้านพลังงานทดแทน

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

ความร่วมมือด้านงานวิจัยและคำปรึกษาจาก Prof.Dr.Bernard Davat, และ Prof.Dr.Serge Pierfederici ที่ Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy (GREEN), Université de Lorraine, France ยังมีส่วนกระตุ้นส่งเสริมให้มีการวิจัยระดับแนวหน้า มีการแลกเปลี่ยนบุคลากรซึ่งกันและกัน ขณะทำงานวิจัยบางส่วนได้รับการสนับสนุนจาก French National Center for Scientific Research (CNRS) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หัวหน้าโครงการวิจัยต้องเดินทางไปทำวิจัยบางส่วนที่ GREEN Lab. ต้องขอบคุณวิศวกรและช่างเทคนิคที่ GREEN Lab. ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและช่วยเหลืออื่น ๆ



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RSA5580009

ชื่อโครงการ : ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและแสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์

ชื่อนักวิจัย :

รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง^{1,2}

¹ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อีเมล: phtt@kmutnb.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 3 ปี

บทคัดย่อ:

โครงการวิจัยนี้นำเสนอโรงไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน จ่ายไฟโดยโซล่าเซลล์ และเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานจ่ายไฟฟ้า โซล่าเซลล์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหลัก เซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายช่วยจ่ายไฟทั้งในสภาวะอยู่ตัวในกรณีที่ไฟไม่พอจากโซล่าเซลล์ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสำรองช่วยจ่ายไฟทั้งสภาวะไดนามิกส์และสภาวะอยู่ตัวในกรณีที่ไฟไม่พอจากโซล่าเซลล์และเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานกำลังสูงและการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปลงไฟกำลังสูง ตัวแปลงไฟแบบทบแรงดันที่ขนานกัน 4 ชุดถูกออกแบบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและสำหรับโซล่าเซลล์โดยที่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ตรงแรงดันต่ำ 60 V โดยมีวงจรแปลงแบบ Dual Active Bridge ที่มีหม้อแปลงความถี่สูงช่วยเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้แรงดันสูงขึ้นต่อกับแบตเตอรี่ตรงแรงดันสูง 200 V เช่นเดียวกันซูเปอร์คาปาซิเตอร์ต่อกับตัวแปลงไฟ Dual Active Bridge ต่อกับแบตเตอรี่ตรงแรงดันสูง

โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์ และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกนำเสนอสำหรับการควบคุมโรงไฟฟ้านี้ โดยทฤษฎีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นของวิธีการแบบแบรนเรียบ ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายขึ้นสำหรับปัญหาสำคัญด้านไดนามิกส์ ด้านเสถียรภาพ ด้านการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบของโรงไฟฟ้า ด้วยวิธีการควบคุมแบบใหม่นี้ทำให้โครงการวิจัยนี้เสนอผลงานต้นแบบ

โรงไฟฟ้าขนาดเล็กต้นแบบได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นจริง ประกอบไปด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิง (1.2 kW) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (0.8 kW) และโมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (100 F) ผลการทดลองพิสูจน์ยืนยันวิธีการควบคุมที่นำเสนอขณะมีโหลด

ผลงานวิจัยของโครงการนี้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI Web of Science จำนวน 3 เรื่อง และนำเสนอในที่ประชุมระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล Scopus จำนวน 2 เรื่อง ด้านการพัฒนาศักยภาพบุคลากรการวิจัยนั้น ประกอบด้วยนักวิจัยที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท จำนวน 1 คน

คำหลัก : ตัวแปลงไฟ, เซลล์เชื้อเพลิง, ระบบไฮบริด, การควบคุมแบบไม่เชิงเส้น, เซลล์แสงอาทิตย์, ซูเปอร์คาปาซิเตอร์

Abstract

Project Code : RSA5580009

Project Title : Magnetic Coupling Converter for Hydrogen/Solar Power Plant with Supercapacitor Storage Device

Investigator :

Assoc.Prof.Dr.Phatiphat Thounthong^{1,2}

¹Renewable Energy Research Centre

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

²Department 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 : 3 years

Abstract:

A renewable energy hybrid power plant, fed by photovoltaic (PV), and fuel cell (FC) sources with a supercapacitor storage device is proposed herein. The PV is used as the main generators; 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.

4-phase parallel boost converters are implemented for the FC converter and the PV converter. These converters are linked to a Low-Voltage DC bus (60 V), which is connected to a High-Voltage DC Bus (200 V) by a Dual Active Bridge converter. A supercapacitor is also connected to a High-Voltage DC bus by a Dual Active Bridge converter.

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, 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. Three (3) research papers were published in international journals (ISI Web of Science) and two (2) technical papers were presented in international conferences (in Scopus). For human resource development, one (1) master degree student was graduated under the support of this project.

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



หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)
“ทุนเพิ่มขีดความสามารถด้านการวิจัยของอาจารย์รุ่นกลางในสถาบันอุดมศึกษา”
(ทุนเมธีวิจัย สกว.) ประจำปีงบประมาณ 2555

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน
และแสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์
 (ภาษาอังกฤษ) Magnetic Coupling Converter for Hydrogen/Solar Power Plant
with Supercapacitor Storage Device

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ

ดร.ปฐพีพัทธ์ ทวนทอง

ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ที่อยู่ 1518 ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

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

E-mail: phtt@kmitnb.ac.th

3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก และอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

4. งบประมาณทั้งโครงการ 1,200,000 บาท

5. ระยะเวลาดำเนินงาน 3 ปี

6. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปมาก ทำให้ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของโลกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อมีความต้องการการใช้ไฟฟ้ามากขึ้นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่เรามี เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือน้ำมันก็ต้องถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่อผลิตไฟฟ้า แน่นอนว่าเมื่อมีความต้องการมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณวัตถุดิบเหล่านี้มีจำนวนลดลงทุกวัน ก็ย่อมทำให้ราคาของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตามกลไกตลาด อย่างที่เราเห็นอยู่ในกรณีของน้ำมันขณะนี้ มากกว่านั้นจากข้อมูลด้านวิทยาศาสตร์และข้อมูลการสำรวจพบว่าอีกประมาณ 35 ปีข้างหน้าน้ำมันจะหมดไปจากโลกแน่นอนไม่เพียงแค่นั้นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติเหล่านี้ เมื่อต้องทำการเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานความร้อนนั้นจะต้องมีการเผาไหม้เกิดขึ้น และโอเสียจากการเผาไหม้เหล่านี้เองที่เราเรียกกันว่าเป็นมลพิษทางอากาศ ก๊าซที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้เหล่านี้ก็ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไนโตรเจนได-ออกไซด์ (NO₂) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเป็นสารพิษต่อร่างกาย

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

ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าด้วยวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติใต้พื้นโลกหรือพลังงานจากฟอสซิลในรูปแบบเดิมๆ นั้นไม่สามารถทำให้ประโยชน์ทางธุรกิจ พลังงาน และสิ่งแวดล้อมก้าวหน้าไปพร้อม ๆ กันได้อย่างเต็มรูปแบบ เพราะการขยายตัวขององค์ประกอบหนึ่ง ย่อมจะส่งผลกระทบในทางตรงกันข้ามกับอีกส่วนหนึ่งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ 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 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยฉบับ 2007 (Power Development Plan 2007) จึงกำหนดทางเลือกในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานนิวเคลียร์เพิ่มในแผนด้วย

เป้าหมายของโครงการวิจัยนี้คือนำเสนอองค์ความรู้ใหม่ในการจ่ายไฟร่วมกันของเซลล์เชื้อเพลิงโซลาร์เซลล์ และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยมี Dual Active Bridge (DAB) 2 ตัวต่อร่วมกัน สิ่งที่ยากลำบากคือการบริหารจัดการพลังงานในระบบให้สมดุล (Energy Management Algorithm) ทำงานที่จุดที่ดีที่สุด (Optimization) เพราะระบบมีแหล่งจ่ายหลายตัว และแหล่งจ่ายแต่ละตัวทำงานที่สภาวะต่างกัน (เช่น แดดจัต ฝนตก) ถ้าระบบควบคุมทำงานอย่างอัตโนมัติ ทำให้ระบบการจ่ายไฟมีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพ งานวิจัยส่วนใหญ่ก่อนหน้านี้จะนำเสนอผลการจำลองมากกว่า ผลลัพธ์ที่ได้จริงทำให้ความน่าเชื่อถือลดลงมาก ดังนั้นโครงการนี้เน้นทดลองจริงและเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จะมีผลเป็นอย่างมากในการผลิต

ไฟฟ้าในประเทศในอนาคต ระบบจ่ายไฟจะเป็นการจ่ายไฟร่วมกันจากหลายแหล่งพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพลังงานทางเลือก

ขณะที่ผู้วิจัยและที่ปรึกษา ทั้งในประเทศและต่างประเทศ (ฝรั่งเศส) มีประสบการณ์ด้านเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลม แบตเตอรี่ และอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากกว่า 10 ปี และปัจจุบันก็ยังเป็นที่ปรึกษาเครือข่ายวิชาการ ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้กับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน และยังเป็นทีปรึกษากลุ่มพลังงานทดแทน สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบ สร้างและทดสอบระบบจ่ายไฟร่วม เพื่อเป็นการประยุกต์นำพลังงานทางเลือกไปใช้งานในประเทศให้มากยิ่งขึ้น เพื่อทดแทนการขาดแคลนพลังงานในอนาคตและการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่สะอาด

7. วัตถุประสงค์

- 1). สร้างระบบจ่ายไฟฟ้าที่มาจากแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดคือโซลาร์เซลล์และเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายหลัก
- 2). เพื่อใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นตัวเก็บพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงและโซลาร์เซลล์ ช่วยจ่ายไฟช่วงที่มีการกระชากของโหลด และเก็บสะสมพลังงานที่ได้จากโซลาร์เซลล์ (แสงแดดตอนกลางวัน)
- 3). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงไปยังระบบจ่ายไฟตรง
- 4). เพื่อสร้างตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับโซลาร์เซลล์ไปยังระบบจ่ายไฟตรง
- 5). เพื่อสร้างตัวแปลง DAB (DAB_I) สำหรับเชื่อม Low-Voltage DC Bus ไปยัง High-Voltage DC Bus
- 6). เพื่อสร้างตัวแปลง DAB (DAB_II) สำหรับเชื่อมซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไปยัง High-Voltage DC Bus
- 7). เพื่อสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติในการจัดการพลังงานของระบบ

8. ระเบียบวิธีวิจัย

- 1). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของวงจรแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ตัดสินใจเลือกวงจรที่เหมาะสม
- 2). ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพลังงานที่เป็นระบบจ่ายไฟแบบผสมตัดสินใจเลือกวิธีการที่เหมาะสม
- 3). วิเคราะห์และเขียน Context Diagram ทั้งระบบ
- 4). แดกระบบเป็น Modules แล้วเขียนออกมาเป็นบล็อกไดอะแกรมย่อย แล้วกระจายงานกันระหว่างทีมวิจัย

- 5). สมการทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB จะถูกนำมาใช้เพื่อจำลองการทำงานของระบบก่อนทดลองกับงานจริง และเพื่อเปรียบเทียบผลจากงานจริงกับการคำนวณ
- 6). บล็อกแต่ละบล็อกจะถูกออกแบบเพื่อสร้างวงจรจริง ทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุม
- 7). บล็อกย่อยแต่ละบล็อกถูกสร้างและทดสอบแยกกันอย่างอิสระก่อน ซึ่งจะมีการปรับปรุงถ้าจำเป็น
- 8). รวมบล็อกทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วทำการทดสอบ เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB รวมทั้งการปรับแต่งระบบ
- 9). เขียนรายงาน สรุปงานวิจัย

9. การเชื่อมโยงกับนักวิจัยที่เป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาที่ทำการวิจัย

โครงการวิจัยนี้อยู่ภายใต้ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กับ Universite de Lorraine ประเทศฝรั่งเศส เป็นงานวิจัยภายใต้กรอบงาน MOU มีนักวิจัยและคณะที่ปรึกษาที่จำนวน 2 ท่านคือ

- 1). Prof.Dr.Bernard Davat
- 2). 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,

Serge.Pierfederici@ensem.inpl-nancy.fr

10. Output จากโครงการวิจัย

10.1). ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI Web of Science (The Thailand Research Fund (TRF) under Grant TRF: RSA5580009)

จำนวน 3 บทความ และกำลังถูกประเมินอีก 1 บทความ

1). Intelligent Model-Based Control of a Standalone Photovoltaic/Fuel Cell Power Plant With Supercapacitor Energy Storage

By: Thounthong, Phatiphat; Luksanasakul, Arkhom; Koseeyaporn, Poolsak; Davat, Bernard.

IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY Volume: 4 Issue: 1 Pages: 240-249

Published: JAN 2013 (Manuscript หน้า 76)

2014 Impact Factor: 3.656

SJR Quartile: Q1

2). Performance investigation of linear and nonlinear controls for a fuel cell/supercapacitor hybrid power plant

By: Thounthong, Phatiphat; Tricoli, Pietro; Davat, Bernard

INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS Volume: 54 Pages: 454-464 Published: JAN 2014 (*Manuscript หน้า 86*)

2012 Impact Factor: 3.432

SJR Quartile: Q1

3). Nonlinear single-loop control of the parallel converters for a fuel cell power source used in DC grid applications

By: Thammasiroj, Warit; Chunkag, Viboon; Phattanasak, Matheepot; Pierfederici, Serge; Davat, Bernard; Thounthong, Phatiphat

INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS Volume: 65 Pages: 41-48 Published: FEB 2015 (*Manuscript หน้า 97*)

2012 Impact Factor: 3.432

SJR Quartile: Q1

4). Energy Management of a Ground Isolated Magnetic Coupling Converter for Supercapacitor Based Transportation Applications

By: Phatiphat Thounthong, Matheepot Phattanasak, Pietro Tricoli, Jean-Philippe Martin, Serge Pierfederici, and Bernard Davat

TRANSPORTATION RESEARCH PART C: EMERGING TECHNOLOGIES, (under review) (*Manuscript หน้า 105*)

2014 Impact Factor: 2.818

SJR Quartile: Q1

10.2). ผลงานนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล Scopus (The Thailand Research Fund (TRF) under Grant TRF: RSA5580009)

จำนวน 2 บทความ

1). Differential flatness based-control of fuel cell/photovoltaic/wind turbine/supercapacitor hybrid power plant,

Thounthong, P.; Sikkabut, S.; Mungporn, P.; Sethakul, P.; Pierfederici, S.; Davat, B. 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Alghero-Italy, Year: 2013, Pages: 298 - 305, DOI: 10.1109/ICCEP.2013.6587005

2). Nonlinear control of a magnetic coupling converter for a supercapacitor storage device for a DC link stabilization,

Thounthong, P.; Phattanasak, M.; Sethakul, P.; Martin, J.-P.; Pierfederici, S.; Davat, B. 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Alghero-Italy, Year: 2013, Pages: 645 - 652, DOI: 10.1109/ICCEP.2013.6586954

10.3 นักวิจัยที่สำเร็จการศึกษา

ระดับปริญญาโทจำนวน 1 คน

นายสุวัจน์ สิกบุตร

Thesis Title: Control of Renewable Energy: Hybrid System for Grid Independent Applications

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2015

หมายเหตุ เป็นที่ปรึกษาร่วม



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)	v
สารบัญ	xi
สารบัญตาราง	xii
สารบัญภาพ	xiii
 บทที่	
1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	1
1.1 เซลล์เชื้อเพลิง	1
1.2 เซลล์แสงอาทิตย์	7
1.3 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์	12
1.4 การขนานตัวแปลงไฟที่มีการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส	21
1.5 ทฤษฎีวงจรแปลงไฟแบบบริดจ์	24
1.6 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)	29
2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	32
2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน	32
2.2 การบริหารจัดการพลังงานในโรงไฟฟ้า	36
3 วิธีการทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	43
3.1 รายละเอียดชุดทดลอง	43
3.2 ผลการทดลองตัวแปลงไฟ	47
3.3 ผลการทดลองโรงไฟฟ้าแบบผสมต้นแบบโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ และซูเปอร์คาปาซิเตอร์	64
4 สรุป	66
เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก ก. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	70



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน	18
3-1 รายละเอียดแหล่งจ่ายไฟและตัวเก็บประจุแต่ละตัว	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	6
1-9 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W	7
1-10 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	7
1-11 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	8
1-12 กราฟลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	9
1-13 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับที่พักอาศัยที่เกาะง่าม จังหวัดตราด	10
1-14 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนำร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์	10
1-15 ระบบโซล่าเซลล์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected)	11
1-16 สนามเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก	11
1-17 ระบบส่งจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	12
1-18 แนวคิดรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต	12
1-19 โครงสร้าง Microscopic ของวัสดุเล็กโตรดแบบ active carbon ในซูเปอร์คาปาซิเตอร์	13
1-20 หลักการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	14
1-21 โครงสร้างของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	14
1-22 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กของบริษัท NEC	15
1-23 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็ก (24 V, 0.4 F, 5.7 kW)	16
1-24 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT	16
1-25 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน	17
1-26 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน	17
1-27 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell (เรียกว่า Booscap) 1 เซลล์ และโมดูลที่ BCAP1200 ต่ออนุกรมกัน 12 ตัว	17
1-28 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	18

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
1-29 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์	19
1-30 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว	19
1-31 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A ของบริษัท Maxwell	20
1-32 เปรียบเทียบพลังงานต่อน้ำหนัก ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) กับกำลังงานต่อน้ำหนัก ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$) ของเทคโนโลยีซูเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเทียมไอออนและแบบนิเกิลเมททอลไฮไดรด์	21
1-33 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกัน 2 วงจร	22
1-34 สัญญาณการสวิตช์ที่ต่างเฟสกัน 180 องศา กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ	22
1-35 กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($I_{CBus,RMS}$) กับวัฏจักรงานของวงจรแปลงผันที่มีการขนาน 2 วงจร	23
1-36 Dual active bridge converter	25
1-37 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบครบวงจร (a) วงจรสมมูลแบบง่ายของหม้อแปลง (b)	26
1-38 วงจรสมมูลแบบง่ายของ DAB converter	26
1-39 กราฟของกระแสและแรงดัน ของ DAB converter เมื่อเฟสของกระแสอยู่ระหว่างรูปกราฟของแรงดัน	28
1-40 ค่าพลังงานเอาต์พุตเฉลี่ยที่ฟังก์ชัน δ	29
1-41 แนวคิดระบบควบคุมแบบฟเลต ซึ่ง y คือตัวแปรเอาต์พุต y_{REF} คือตัวแปรเอาต์พุตที่อ้างอิง u คือตัวแปรอินพุตที่ควบคุม	30
2-1 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน “ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและแสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์”	33
2-2 ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง	33
2-3 ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	33
2-4 ไดอะแกรมระบบควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบผสม	41
2-5 ฟังก์ชันคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโซล่าเซลล์ MPPT _{PV}	42
3-1 ชุดทดลองโรงไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็กจ่ายไฟโดยพลังงานแสงอาทิตย์พลังงานไฮโดรเจน และซูเปอร์คาปาซิเตอร์	43
3-2 แผงโซล่าเซลล์ (ติดตั้งบนดาดฟ้าสถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส)	44
3-3 โมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์	44
3-4 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟหลัก Dual Active Bridge Converter DAB_I	45
3-5 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำรอง Dual Active Bridge Converter DAB_II	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-6 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Converter)	46
3-7 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับโซลาร์เซลล์ (PV Converter)	47
3-8 ผลการทดลองจริง: DAB_I ที่ $v_1 = 60$ V, $i_1 = 4.54$ A, $v_{Bus} = 180$ V.	48
3-9 ผลการทดลองจริง: DAB_I ที่ $v_1 = 60$ V, $i_1 = 4.82$ A, $v_{Bus} = 184$ V.	49
3-10 ผลการทดลองจริง: DAB_I ที่ $v_1 = 60$ V, $i_1 = 4.87$ A, $v_{Bus} = 186$ V.	50
3-11 ผลการทดลองจริง: DAB_I ที่ $v_1 = 60$ V, $i_1 = 9.08$ A, $v_{Bus} = 218$ V.	51
3-12 ผลการทดลองจริง: DAB_II ที่ $v_{SC} = 20.5$ V, $i_{SC} = -9.70$ A, $v_{Bus} = 150$ V.	53
3-13 ผลการทดลองจริง: DAB_II ที่ $v_{SC} = 24.9$ V, $i_{SC} = -24.36$ A, $v_{Bus} = 200$ V.	54
3-14 ผลการทดลองจริง: DAB_II ที่ $v_{SC} = 22.72$ V, $i_{SC} = +6.82$ A, $v_{Bus} = 150$ V.	55
3-15 ผลการทดลองจริง: DAB_II ที่ $v_{SC} = 22.37$ V, $i_{SC} = +14.96$ A, $v_{Bus} = 200$ V.	56
3-16 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 12 A ขณะที่แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 34.2 V และแรงดันที่บัสไฟตรงเท่ากับ 60 V	58
3-17 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 28 A ขณะที่แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 31.1 V และแรงดันที่บัสไฟตรงเท่ากับ 60 V	59
3-18 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 40 A ขณะที่แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 28.8 V และแรงดันที่บัสไฟตรงเท่ากับ 60 V	60
3-19 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับโซลาร์เซลล์ ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 6 A ขณะที่แรงดันของโซลาร์เซลล์เท่ากับ 27.1 V และแรงดันที่บัสไฟตรงเท่ากับ 60 V	61
3-20 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับโซลาร์เซลล์ ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 8 A ขณะที่แรงดันของโซลาร์เซลล์เท่ากับ 26.4 V และแรงดันที่บัสไฟตรงเท่ากับ 60 V	62
3-21 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับโซลาร์เซลล์ ที่กระแสอ้างอิงเท่ากับ 10 A ขณะที่แรงดันของโซลาร์เซลล์เท่ากับ 25.4 V และแรงดันที่บัสไฟตรงเท่ากับ 60 V	62
3-22 ผลการทดลองจริง การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด	63

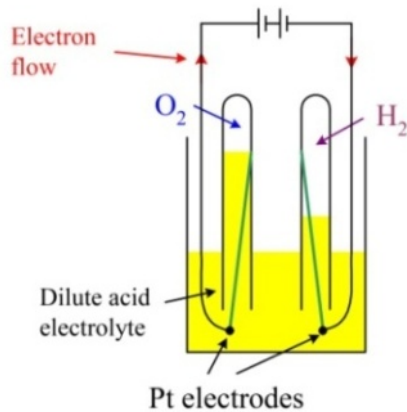


ในการทำการวิจัยเรื่อง ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและแสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์ มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

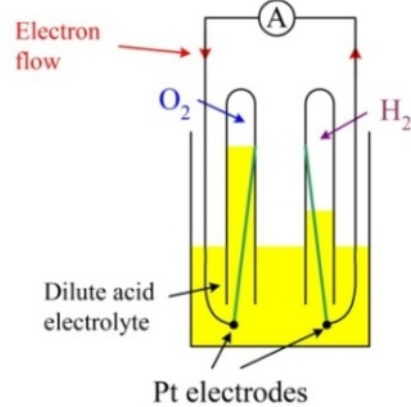
- 1.1 เซลล์เชื้อเพลิง
- 1.2 เซลล์แสงอาทิตย์
- 1.3 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์
- 1.4 การขนานตัวแปลงไฟที่มีการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส
- 1.5 ทฤษฎีวงจรแปลงไฟแบบบริดจ์
- 1.6 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)

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 เมื่อขวดสองอันนี้ถูกจุ่มรวมกันด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองและเกิดน้ำขึ้นในขวดที่บรรจุก๊าซทั้งสอง ดังแสดงในภาพที่ 1-1 เพื่อที่จะเพิ่มแรงดันต่ำที่ผลิตออกมานั้น เขาได้ต่ออุปกรณ์เหล่านี้แบบอนุกรมกันและเขาได้เรียกอุปกรณ์นี้ในขณะนั้นว่า “ก๊าซแบตเตอรี่” ซึ่งเป็นต้นแบบของเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบัน



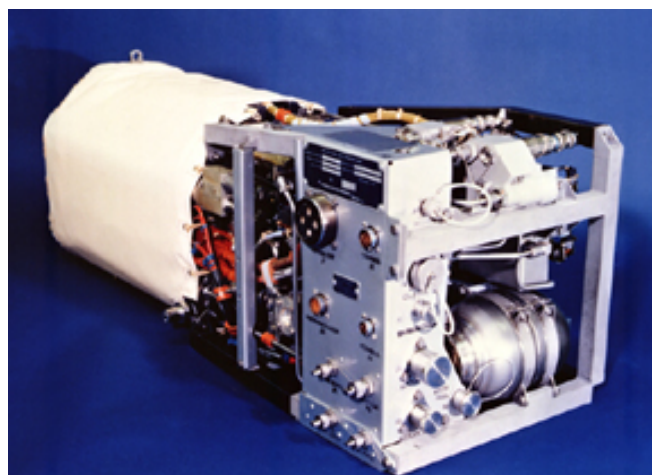
The electrolysis of water



The electrolysis of water is reversible

ภาพที่ 1-1 แนวคิดเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบที่คิดค้นโดย Sir William Robert Grove

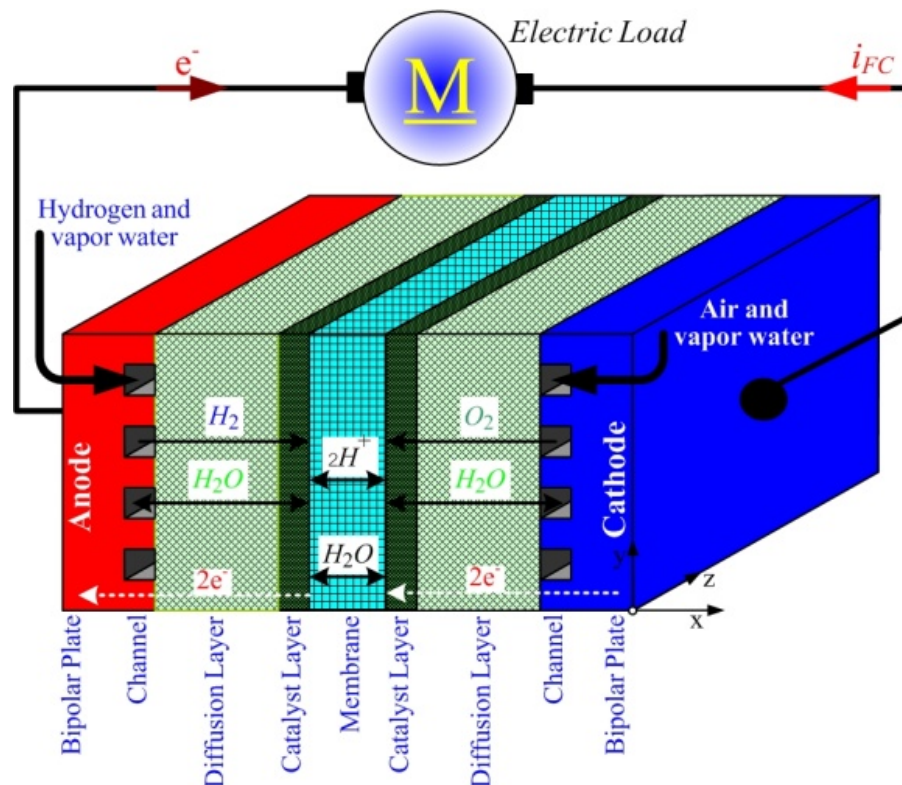
เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์แปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่ก่อกมลพิษ พลังงาน (อิเล็กตรอน) จะถูกส่งออกมาเมื่อเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) ทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศและทำให้เกิดน้ำบริสุทธิ์และความร้อนควบคู่ตามมา ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้เกิดขึ้นและพลังงานถูกส่งออกมาในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าคือไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต่ำพร้อมกับความร้อน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



ภาพที่ 1-2 เซลล์เชื้อเพลิง 12 kW สำหรับสถานีอวกาศของนาซา

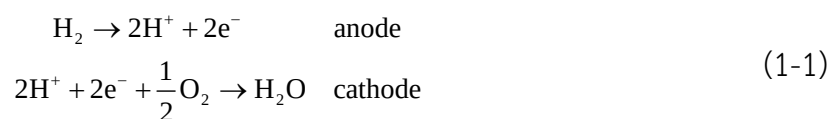
1.1.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แสดงในภาพที่ 1-3 [3] ก๊าซซึ่งไหลมาตามทิศทาง x มาจากช่องที่ถูกออกแบบเป็นแผ่นแบบสองชั้น (หนา 1-10 mm) ไอน้ำถูกนำมารวมกับก๊าซเพื่อให้ ความชื้นกับเมมเบรน ชั้นการกระจายตัว (diffusion layers: 100-500 μm) มีไว้เพื่อการ แพร่กระจายที่ดีของก๊าซไปยังชั้นปฏิกิริยา (reaction layers : 5-50 μm) ชั้นเหล่านี้ได้ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าของเซลล์ซึ่งทำด้วยแพลตินัมทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 1-3 ชั้นต่างๆ ของเซลล์พื้นฐานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

การทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนและออกซิเจนคือ



ถูกแยกจากกันโดยเมมเบรน (20-200 μm) ซึ่งนำโปรตอนจากขั้วแอโนด (Anode) ไปขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งอิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ การเคลื่อนที่ของโปรตอนนี้ได้ดึงโมเลกุลของ น้ำมาด้วยทำให้เกิดการกระจายของความชื้นในเมมเบรน โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่กระจายไป ได้ทั้งสองทิศทางภายในเมมเบรนตามฝั่งที่ก๊าซมีความชื้นมากและตามความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กันโดยตรงกับการไหลของโปรตอนผ่านเมมเบรนและโดยตรงกับการ ปริมาณน้ำที่ผลิตในฝั่งแคโทด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในฝั่งแอโนดนั้นไม่สามารถผ่านเมมเบรนและได้

ถูกใช้ในวงจรไฟฟ้าภายนอกเช่น มอเตอร์ หลอดไฟ อื่นๆ ก่อนย้อนกลับสู่แคโทด การไหลของอิเล็กตรอนหรือเรียกว่ากระแสไฟฟ้านั้นสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

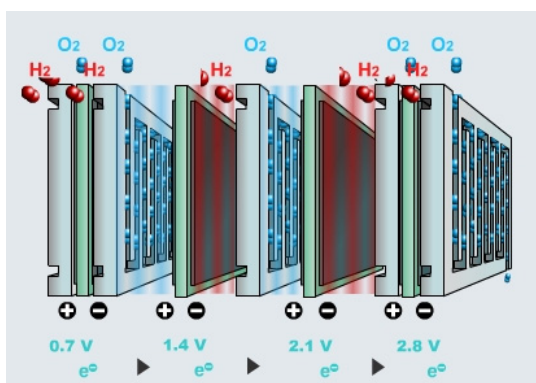
$$J_{H^+} = \frac{i}{F} \quad (1-2)$$

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday)

ค่าแรงดันเอาต์พุตของเซลล์หนึ่งเซลล์มาจากพลังงานปลดปล่อยอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy ΔG) คือ

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

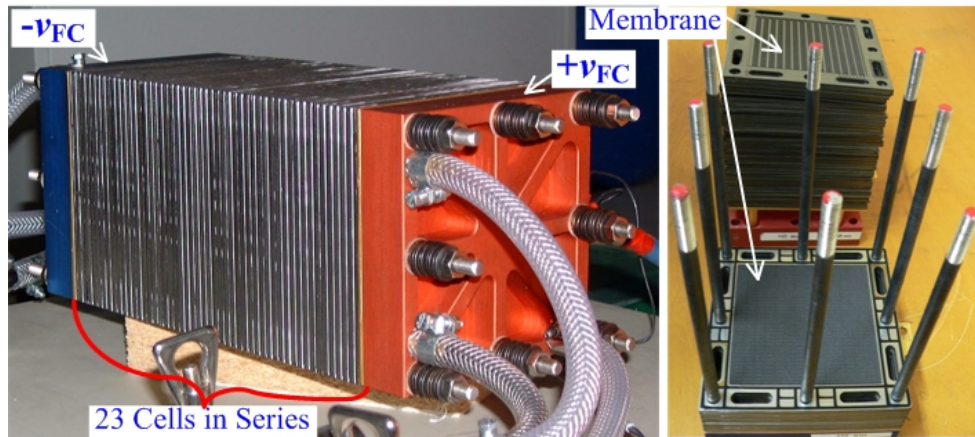
ซึ่งแรงดันนี้ไม่เคยได้ถึงค่าทางทฤษฎี แม้กระทั่งในสภาพที่ไม่มีโหลด แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ที่พิกัดกระแส (ประมาณ 0.5 A.cm^{-2}) มีค่าประมาณ $0.6 - 0.7 \text{ V}$ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างโดยนำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน โดยประกอบเป็นชั้นๆ ดังภาพที่ 1-4 เพื่อที่จะเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น



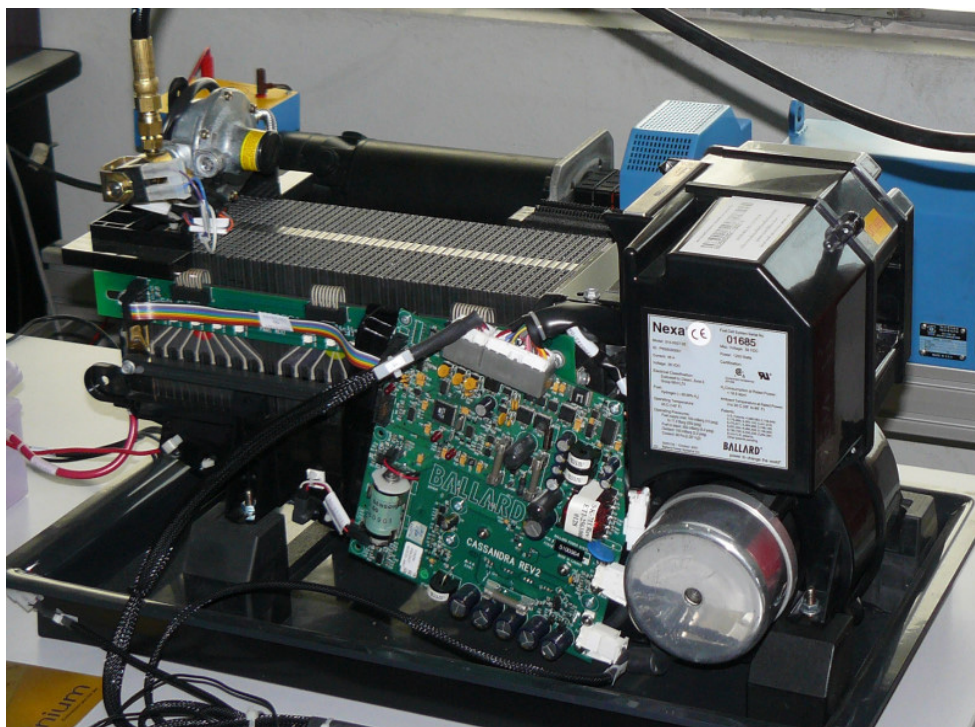
ภาพที่ 1-4 การต่อเซลล์แบบอนุกรมของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มแรงดัน

ตัวอย่างการอนุกรมเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 23 เซลล์ต่ออนุกรม ขนาด 500 W , 40 A ประมาณ 13 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 เซลล์

เชื้อเพลิงนี้ปัจจุบันถูกนำไปใช้ในงานวิจัยที่สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ดังแสดงในภาพที่ 1-6



ภาพที่ 1-5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 23 เซลล์ต่ออนุกรม

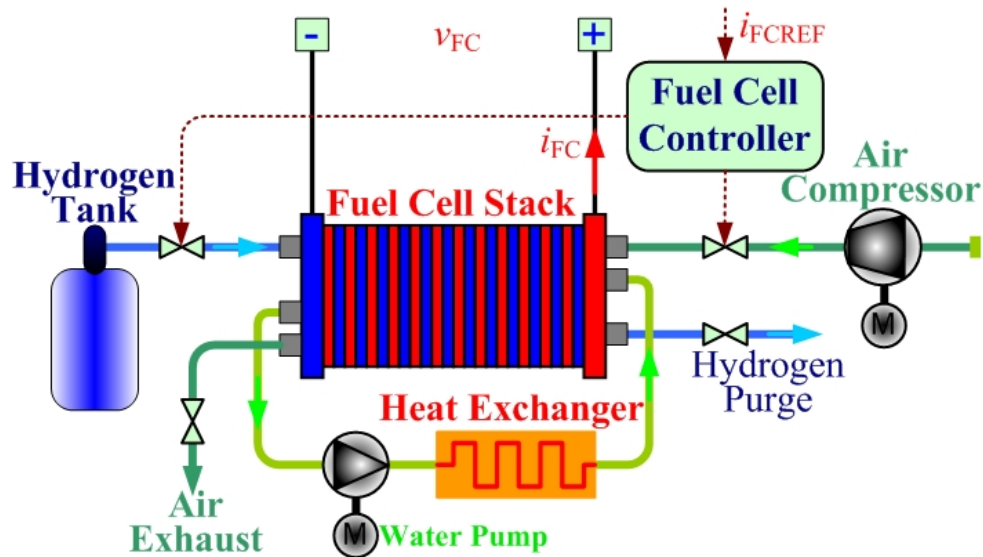


ภาพที่ 1-6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 47 เซลล์ต่ออนุกรม

1.1.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีความจำเป็นในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [4], [5] เช่น การป้อนก๊าซและการระบายความร้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นระบบเซลล์เชื้อเพลิงจึงประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ภาพที่ 1-7 แสดงระบบอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ประกอบด้วยถังไฮโดรเจน ตัวควบคุมความชื้นวาล์ว ตัวระบายและแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่ง V_{FC} คือแรงดันของ

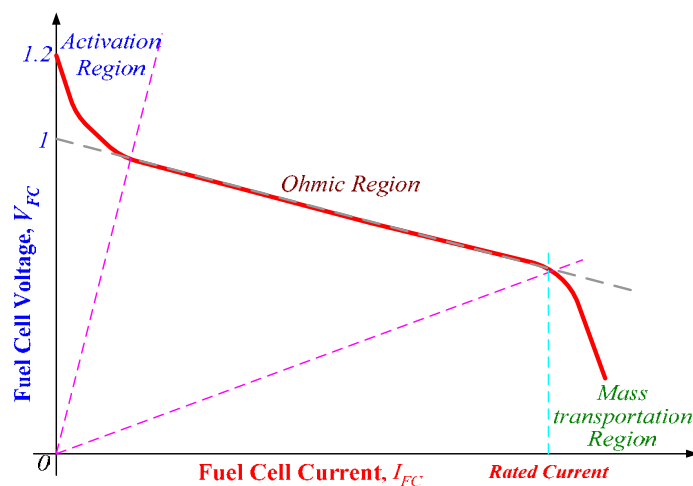
เซลล์เชื้อเพลิง i_{FC} คือกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง i_{FCREF} คือกระแสอ้างอิงของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อควบคุมการจ่ายไฮโดรเจนและอากาศ



ภาพที่ 1-7 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

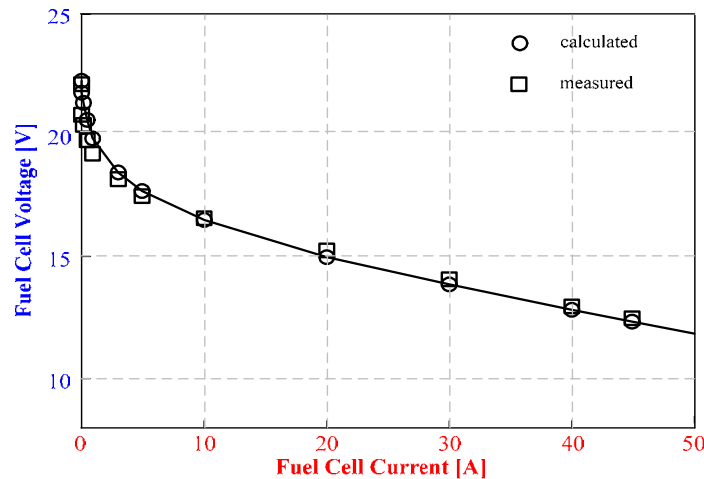
ภาพที่ 1-8 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า [6] กราฟที่ได้ประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ

- ปรากฏการณ์กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเชิงเส้นที่แรงดันตก มีสาเหตุจากความต้านทานภายใน
- ส่วนสุดท้ายคือพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด กลายเป็นปัจจัยจำกัดทำให้แรงดันตกอย่างมาก



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) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้าและจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้นทำให้สามารถทำงานได้

1.2.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

แบ่งตามวัสดุที่ใช้เป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ



Single Crystalline Silicon Solar Cell

Polycrystalline Silicon Solar Cell

Amorphous Silicon Solar Cell

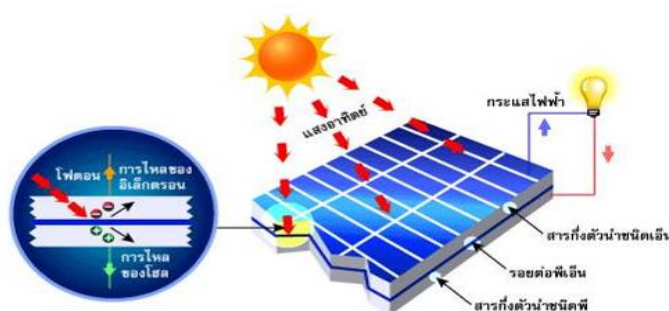
ภาพที่ 1-10 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

- 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 เทลเลไนด์ 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 ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

1.2.4 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

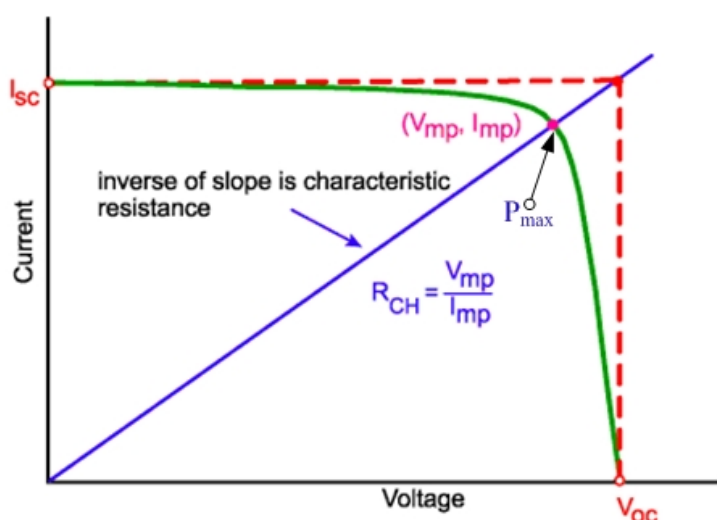


ภาพที่ 1-11 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

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 ระบบไฟฟ้านี้ไม่ต่อเข้าระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า โดยเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าสำหรับแสงสว่าง ตู้เย็นและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่กำลังต่ำๆ และจากข้อมูลหลายๆ ประเทศที่มีระบบจ่ายไฟแบบนี้ จะมีกำลังไฟฟ้าอยู่ประมาณ 1000 W และเป็นทางเลือกทางหนึ่งในการประหยัดและช่วยระบบจ่ายไฟหลักสำหรับบ้านหรือหมู่บ้านที่อยู่ห่างจากระบบจ่ายไฟหลักมากกว่า 1 ถึง 2 กิโลเมตร ในภาพที่ 1-13 แสดงตัวอย่างการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับที่พัก

อาศัยที่เกาะง่าม 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 ปั๊มน้ำ ตู้แช่วัคซีน หรือระบบนาร่อง งานเหล่านี้ไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมากนัก แต่มีความจำเป็นต้องการกำลังไฟฟ้าจ่ายไฟเลี้ยงระบบ ทำให้ราคากระบบจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นี้สามารถแข่งขันกับระบบจ่ายไฟกำลังต่ำด้วยแหล่งจ่ายอื่นได้ ซึ่งภาพที่ 1-14 แสดงระบบไฟเลี้ยงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนาร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์



ภาพที่ 1-14 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนาร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์

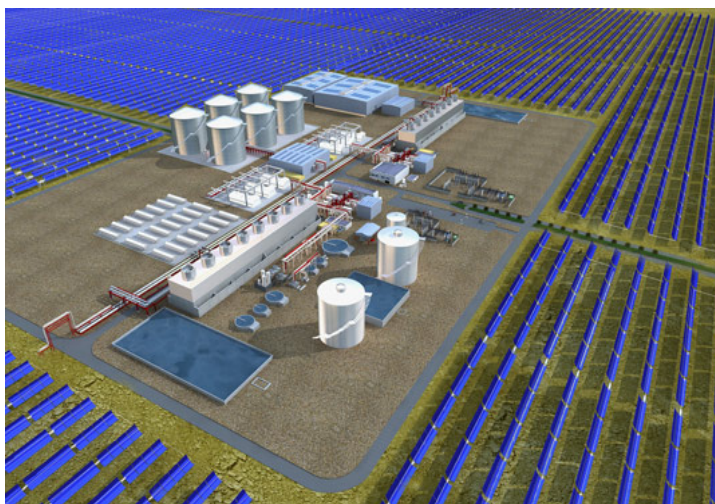
1.2.6.3 ระบบจ่ายไฟที่ต่อเข้ากับระบบ (Grid Connected) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ถูกติดตั้งเพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบให้ผู้บริโภคหรือต่อโดยตรงเข้ากับระบบไฟของการไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ของระบบไฟฟ้าที่มีวงพื้นที่จำกัดผู้บริโภคแทนที่จะเป็นระบบจ่ายไฟขนาดใหญ่ ขนาดของระบบนี้ไม่เป็นที่แน่นอน อาจจะมีขนาดถึง 1 MW ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านพักอาศัย ซึ่ง

ในภาพที่ 1-15 แสดงระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected) ที่โรงงานของ บริษัทเอกรัฐโซล่า ที่จังหวัดระยอง มีขนาด 8.28 kW โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเอกรัฐโซล่า



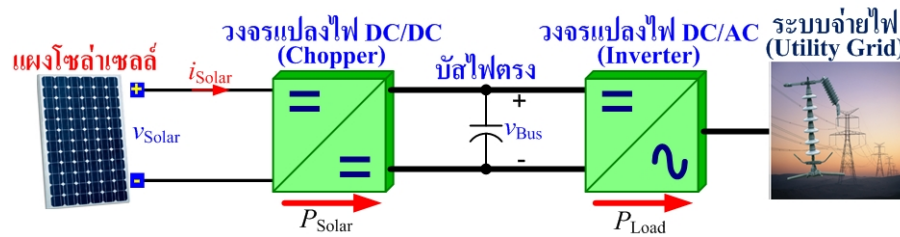
ภาพที่ 1-15 ระบบโซล่าเซลล์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected)

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

เซลล์แสงอาทิตย์กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงดังนั้นมีจำเป็นต้องแปลงระดับไฟตรงเป็นระดับ ไฟตรงที่ต้องการ ก่อนด้วยวงจรแปลงไฟที่เรียกว่า “ซีอ็อปเปอร์” (DC/DC Converter) หลังจากนั้นจึงต้องมีตัวแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ เรียกว่า “อินเวอร์เตอร์” (Inverter, DC/AC Converter) จ่ายไฟฟ้าให้ผู้บริโภคหรือต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 1-17

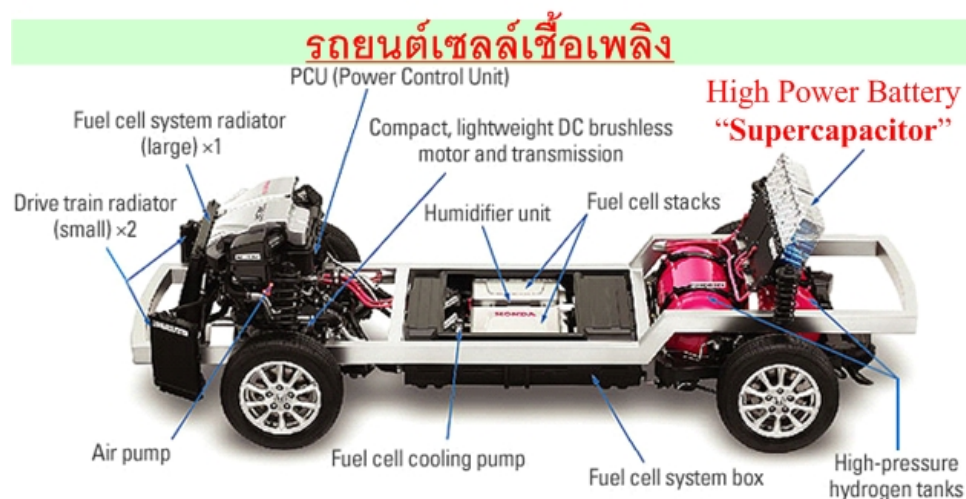


ภาพที่ 1-17 ระบบส่งจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

1.3 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์

ตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 90 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่สำหรับนำไปใช้กับงานกำลังไฟฟ้าที่สูงได้เริ่มถูกผลิตขึ้น [8] หน่วยความจุของคาปาซิเตอร์จะมีหน่วย ฟาราดส์ (Farads) ปัจจุบันความจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าสูงมากถึงเป็น “พันฟาราดส์” 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 [9]

ส่วนประกอบที่ใหม่ของอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดนี้ ช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างคาปาซิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์กับแบตเตอรี่แบบเดิม และยังทำให้เกิดการจัดการพลังงานไฟฟ้าในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบผสม แหล่งจ่ายแบบนี้จะใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งพลังงานสำรองควบคู่ไปกับแหล่งจ่ายพลังงานหลัก จากหลักการดังกล่าวจะรวมเอาข้อดีของเทคโนโลยีในการเก็บสะสมพลังงานคือระดับปริมาณพลังงาน และกำลังไฟฟ้าที่มีมากพอสำหรับการใช้งานที่ยาวนาน อีกทั้งลดปริมาตรและน้ำหนักของแหล่งจ่ายให้น้อยที่สุด ภาพที่ 1-18 แสดงรถยนต์ไฮโดรเจน (รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิง) ต้นแบบที่มีซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับระบบ



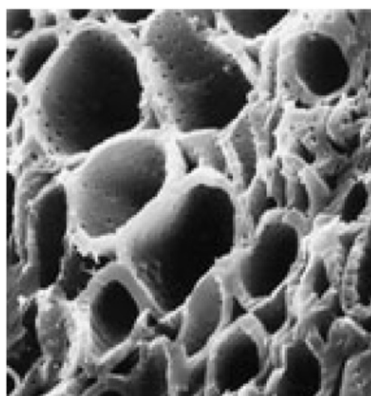
ภาพที่ 1-18 แนวคิดรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต

1.3.1 หลักการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์

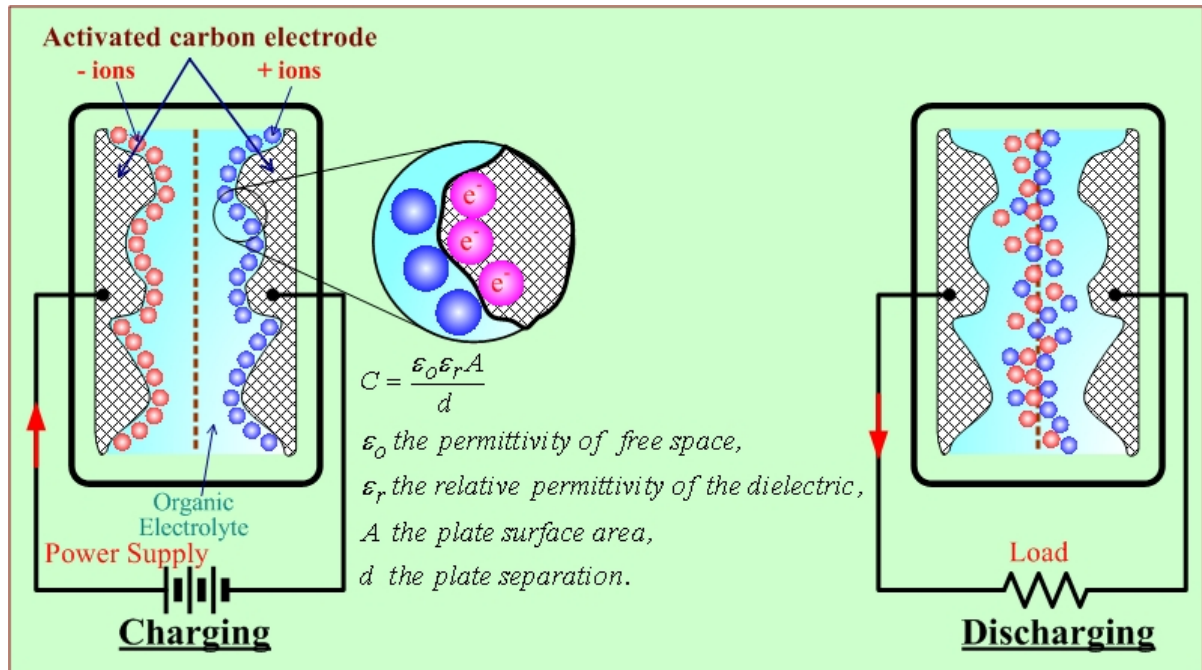
เป็นหลักการพื้นฐานของคาปาซิเตอร์แบบประจุไฟฟ้า 2 ชั้น (Electric Double-Layer) จากคุณสมบัติประจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าชนิดแข็งกับตัวนำประจุไฟฟ้าของเหลว คุณสมบัตินี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1853 โดย Helmholtz (นักวิทยาศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่และผู้คิดสูตรทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ ในศตวรรษที่ 19) การเก็บพลังงานได้จากพื้นที่ถ่ายเทประจุระหว่างของแข็งกับของเหลวภายใต้ไฟฟ้าสถิต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

เพื่อรักษาข้อดีของหลักการประจุไฟฟ้า 2 ชั้นในด้านพลังงานและความจุไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ โดยไม่เพิ่มปริมาตรมากเกินไปเพื่อให้ได้ตามจุดประสงค์นี้ จึงมีการใช้วัสดุอิเล็กโทรดแบบมีพรong ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก เทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดโดยการใช้แอคทีฟคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 1-19 ที่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีมากกว่า $1000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ จนถึง $3000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ และทำให้ได้ความจุสูงหลายร้อยฟาราดส์ ต่อหนึ่งเซลล์ดังแสดงใน ภาพที่ 1-20 และ 1-21 ประกอบด้วย

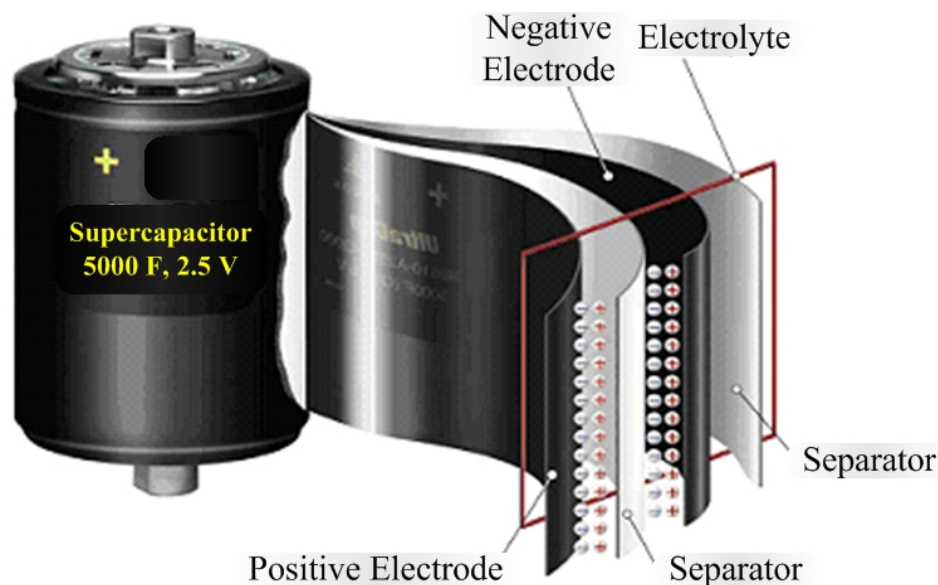
- อิเล็กโทรด 2 ตัวชนิดคาร์บอนเป็นพรongแช่ในอิเล็กโทรไลต์
- เมมเบรนที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแต่เป็นตัวนำประจุระหว่างอิเล็กโทรด ป้องกันการลัดวงจร
- ขั้วต่อที่เป็นโลหะ โดยปกติเป็นอะลูมิเนียม



ภาพที่ 1-19 โครงสร้าง Microscopic ของวัสดุอิเล็กโทรดแบบ active carbon ในซูเปอร์คาปาซิเตอร์



ภาพที่ 1-20 หลักการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์



ภาพที่ 1-21 โครงสร้างของซูเปอร์คาปาซิเตอร์

1.3.2 เทคโนโลยีซูเปอร์คาปาซิเตอร์

แนวคิดของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีมานานแล้ว ตั้งแต่การค้นพบหลักการของประจุไฟฟ้าแบบ 2 ชั้น (electric double layer) แต่อย่างไรก็ตาม สิทธิบัตรแรกเกี่ยวกับซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นของบริษัท General Electric ลงทะเบียนในปี ค.ศ. 1957 ผู้ประดิษฐ์ได้อธิบายการเก็บสะสมพลังงานโดยประจุไฟฟ้าแบบ 2 ชั้นที่ถูกพัฒนาจากการประสานระหว่างอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนแบบมีพรongและอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว (กรดซัลฟูริก) ในปี ค.ศ. 1969 สิทธิบัตรอีก

ขึ้นจากบริษัท SOHIO ได้ทำการจดทะเบียนซึ่งได้อธิบายซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ทนแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าโดยใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เป็นของเหลว

เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้ถูกใช้งานอย่างประสบความสำเร็จ ที่เมืองโคโลญน์ประเทศเยอรมันนีและล่าสุดได้มีการนำซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไปใช้งานรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่สำหรับระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรม ลิฟต์ และ รถไฟฟ้า

แรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ $v_C(t)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่รู้จักกันเป็นอย่างดี [10] คือ

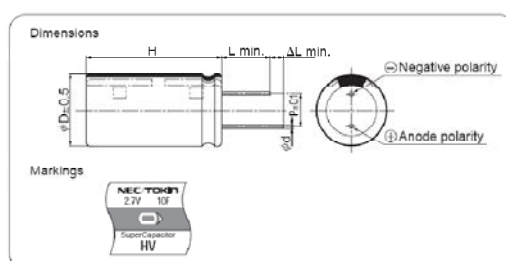
$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C(t) \cdot dt + v_C(t_0) \quad (1-4)$$

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

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

$$E_C(t) = \frac{1}{2} C \cdot v_C^2(t) \quad (1-5)$$

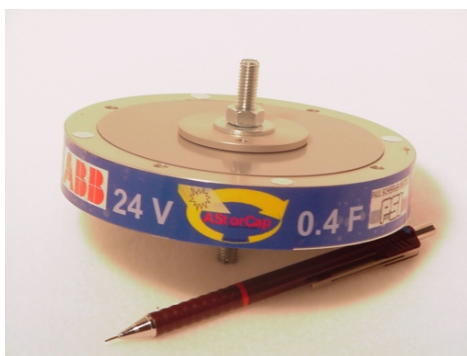
ขณะทำงานการคายของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้เริ่มต้นเพียงไม่กี่ปี อุปกรณ์ที่ประกอบด้วย อิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนและอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นแบบของเหลวและออกแบบโดยบริษัท NEC และ Matsushita ซึ่งมีขนาดเล็ก (ค่าความจุต่ำประมาณ $0.5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) สำหรับใช้งานด้านสัญญาณ เช่นหน่วยความจำสำรอง ตั้งแต่ต้นยุคปี ค.ศ. 1990 ภาพที่ 1-22 แสดงขนาดตัวอย่างซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กขนาด 2.7 V, 10 F, 22 F, 50 F และ 100 F ของบริษัท NEC และในภาพที่ 1-23 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)
					ØD	H	P	Ød	I	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 1-22 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กของบริษัท NEC

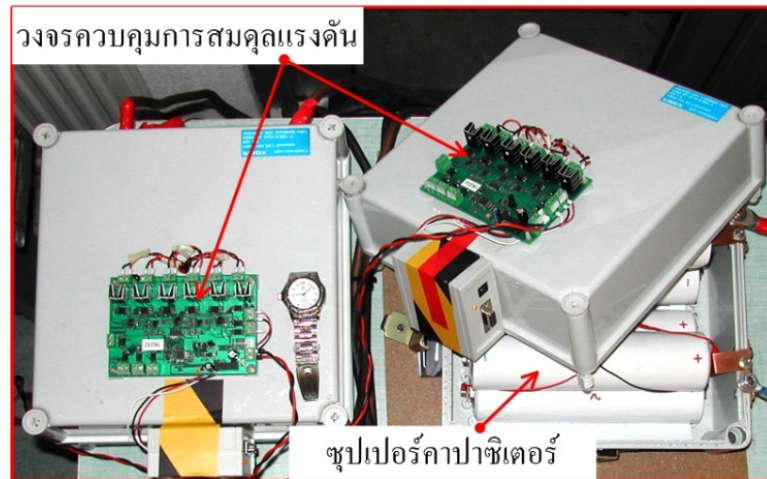


ภาพที่ 1-23 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็ก (24 V, 0.4 F, 5.7 kW)

ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง (มีค่าความจุเป็น kF มีระดับความหนาแน่นพลังงาน ($\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) และกำลังไฟฟ้า $\text{kW} \cdot \text{kg}^{-1}$ ที่สูงมาก) ซึ่งสามารถหาซื้อได้ในปัจจุบัน ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์หนึ่งเซลล์จะมีแรงดันต่ำมาก ดังนั้นเมื่อนำไปต่อใช้งานจะนำมาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันและถ้าต้องการเพิ่มความจุก็จะนำมาต่อขนานกันได้อีกเป็นวิธีการเดียวกับแบตเตอรี่ ในภาพที่ 1-24 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT ขนาด 3500 F, 2.5 V, 500 A, 0.65 kg ภาพที่ 1-25 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน ($292 \text{ F} = 3500/12$, $30 \text{ V} = 2.5 \times 12$) และภาพที่ 1-26 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน ($32.4 \text{ F} = 3500/108$, $270 \text{ V} = 2.5 \times 108$) ภาพที่ 1-27 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 1-28 แสดงซุปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าขนาด 29 F, 250 V, 45 kW, 53 kg เป็นซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell สำหรับงานสำรองไฟกำลังสูง ขณะที่ตารางที่ 1-1 เป็นตัวอย่างซุปเปอร์คาปาซิเตอร์แต่ละผู้ผลิตที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน



ภาพที่ 1-24 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT



ภาพที่ 1-25 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน



ภาพที่ 1-26 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน



ภาพที่ 1-27 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท Maxwell (เรียกว่า Booscap) 1 เซลล์ และโมดูลที่ BCAP1200 ต่ออนุกรมกัน 12 ตัว



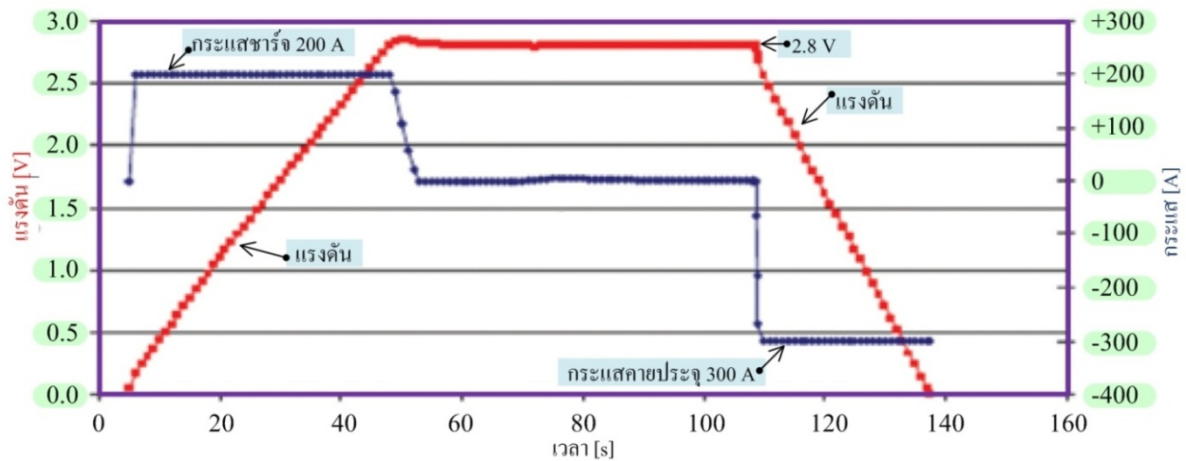
ภาพที่ 1-28 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 1-1 ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน

ผู้ผลิต	แรงดัน [V]	ความจุ [F]	ESR [mΩ]	Wh·kg ⁻¹	W·kg ⁻¹	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

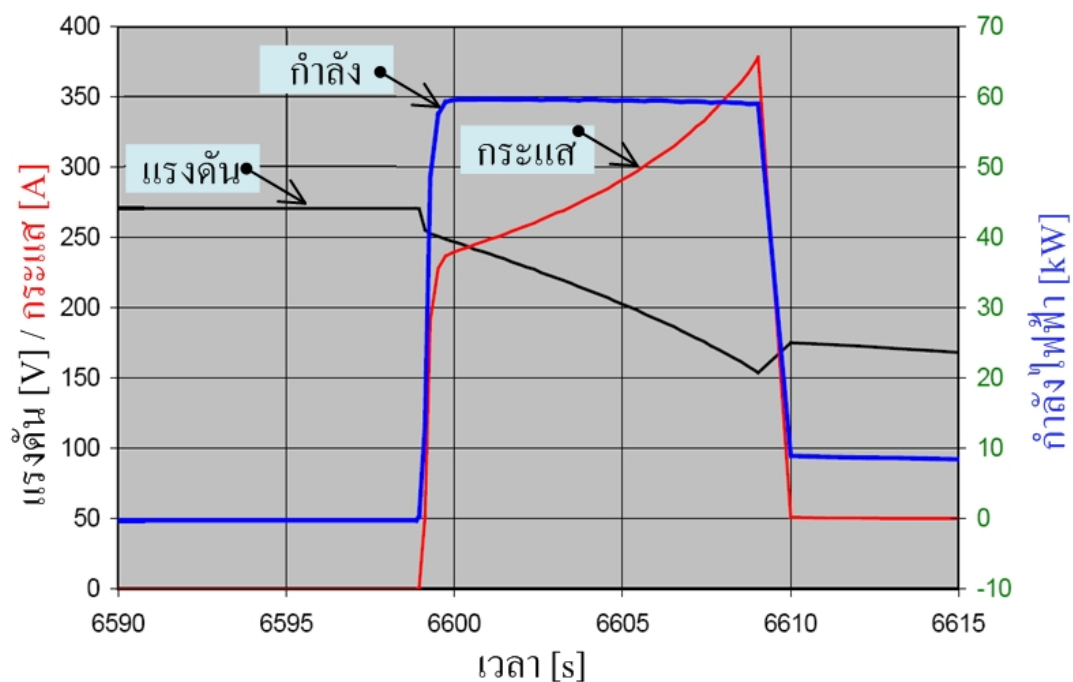
1.3.3 ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

การนำซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ไปใช้งานสำหรับเป็นระบบสำรองไฟช่วงสั้น ๆ แต่จะทำงานที่จ่ายกระแสหรือกำลังไฟฟ้าที่สูง ภาพที่ 1-29 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ขณะทำการทดสอบซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์ (2.8 V, 3200 F) ของ บริษัท LS Cable ขณะเก็บประจุที่กระแสคงที่ 200 A และคายประจุที่กระแส 300 A



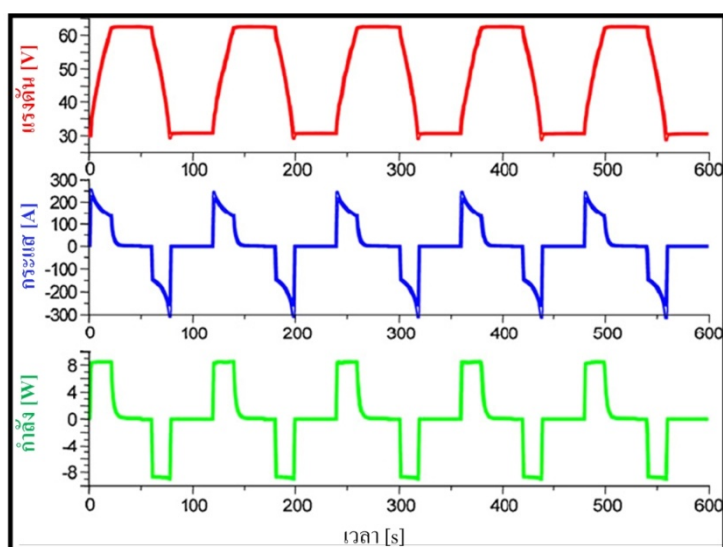
ภาพที่ 1-29 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์

ขณะที่ภาพที่ 1-30 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 (1-4) และสมการที่ (1-5) ทำให้กระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น (จ่ายกระแสมากขึ้น) เพราะกำลังไฟฟ้าคงที่



ภาพที่ 1-30 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



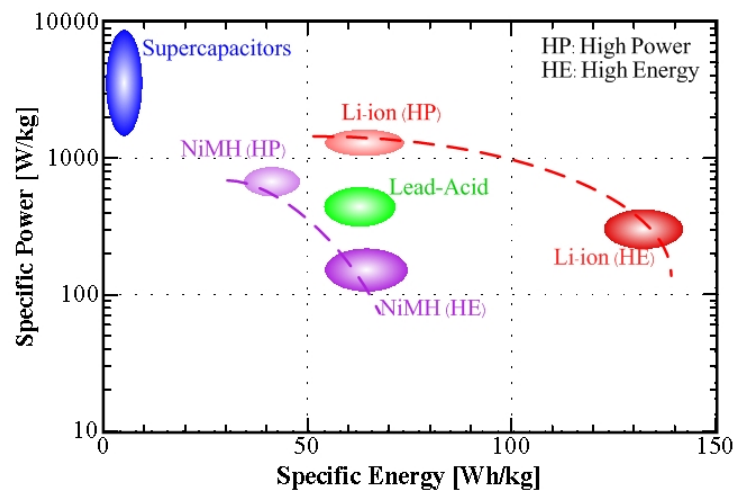
ภาพที่ 1-31 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A ของบริษัท Maxwell

1.3.4 เปรียบเทียบแบตเตอรี่กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์

เนื่องจากแบตเตอรี่ทั่วไปมีค่าความต้านทานภายในที่สูงกว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 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 ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$) ของเทคโนโลยีซูเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเทียมไอออนและแบบนิเกิลเมททอลไฮไดรด์ จะเห็นได้ชัดว่าถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ จะมีพลังงานต่อน้ำหนัก ($\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) ที่สูงกว่า

ซูเปอร์คาปาซิเตอร์อยู่มากก็ตาม แต่ต้องไม่ลืมว่าซูเปอร์ คาปาซิเตอร์สามารถจ่ายไฟได้เร็วมากเพราะมีค่าความต้านทานภายในที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ ในขณะที่อายุการใช้งานของแบตเตอรี่แบบตะกั่วอยู่ที่ 1000 รอบ (Charge/Discharge Cycle) แต่ซูเปอร์ คาปาซิเตอร์จะมีอายุการใช้งานที่นานมาก เราอาจจะประมาณได้ว่ามีอายุเป็นอนันต์ [11]

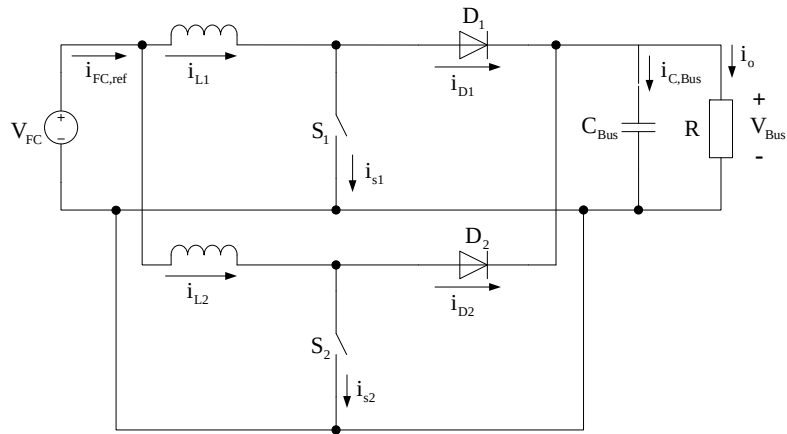


ภาพที่ 1-32 เปรียบเทียบพลังงานต่อน้ำหนัก ($\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) กับกำลังงานต่อน้ำหนัก ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$) ของเทคโนโลยีซูเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเทียมไอออนและแบบนิเกิลเมทัลไฮไดรด์

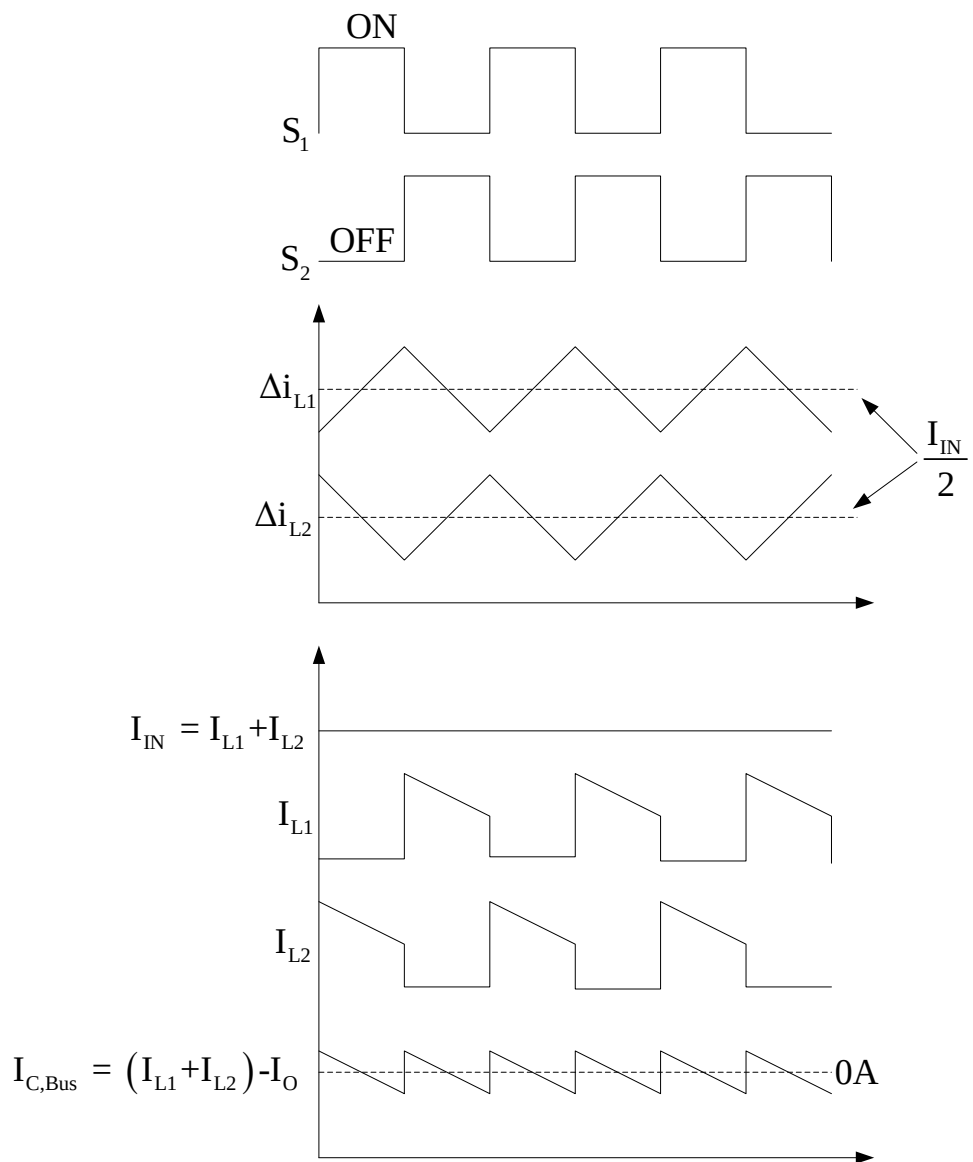
1.5 การขนานตัวแปลงไฟที่มีการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส

เทคนิคการสวิตช์แบบเหลื่อมเฟส (Interleaved Technique) สามารถทำได้โดยการนำเอาสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรแปลงผันหลายๆ วงจรมาต่อขนานกัน แล้วกำหนดสัญญาณขับนำสวิตช์ให้เหลื่อมเวลาการทำงานกันออกไปเพื่อให้วงจรสลับการทำงานซึ่งกันและกันโดยจะแบ่งมุมการทำงานของสัญญาณขับนำสวิตช์ให้ทำงานให้ครบกันพอดีในแต่ละหนึ่งรอบเวลาการทำงาน ($360/N$) [12], [13] ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนวงจร (N) ที่นำมาต่อขนานกันและมีความถี่ของการสวิตช์เท่ากันและหลักการนี้จะทำให้แอมพลิจูดของกระแสกระแสเพื่อลดลงและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของความถี่กระแส โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียที่สวิตช์หรืออุปกรณ์ การนำวงจรแปลงผันแบบบัสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกันโดยใช้เทคนิคการเหลื่อมเฟส เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้นและลดค่าการกระเพื่อมของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำทำให้สามารถลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำลงได้

ตัวอย่างเช่นวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกัน 2 วงจร ดังในภาพที่ 1-33 โดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสอินพุตสูงโดยจัดให้มีเฟสของสัญญาณนำขับสวิตช์ตัวบนและตัวล่างห่างกัน 180 องศา ซึ่งกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวกลับเฟสกัน 180 องศา และกระแสเอาต์พุตจะมีขนาดการกระเพื่อมลดลงครึ่งหนึ่ง ดังในภาพที่ 1-34

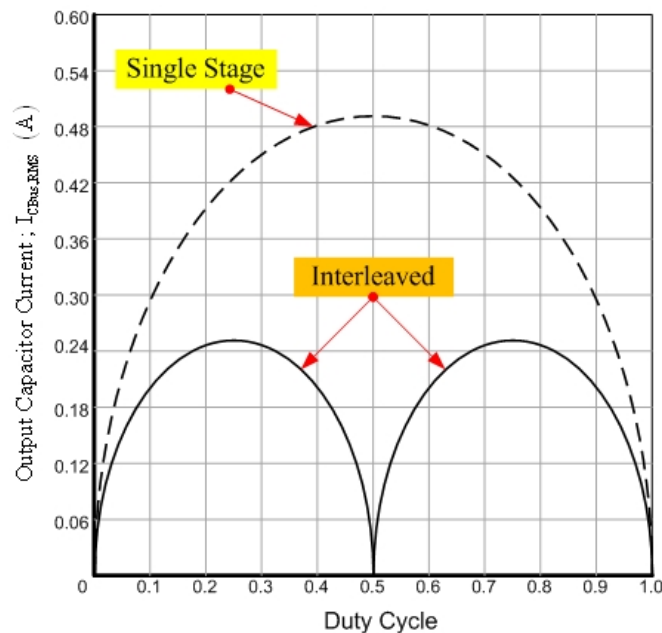


ภาพที่ 1-33 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกัน 2 วงจร



ภาพที่ 1-34 สัญญาณการสวิตช์ที่ต่างเฟสกัน 180 องศา กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

จากคุณสมบัติของการเหลื่อมเฟสที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สามารถนำค่าการกระเพื่อมของแต่ละวงจรมาหักล้างกันได้ (Ripple Cancellation) นั่นคือค่าการกระเพื่อมที่ด้านออกลดลงและขนาดค่าการกระเพื่อมจากการหักล้างกันของสองวงจรมีความสัมพันธ์กับวัฏจักรงานดังในภาพที่ 1-35 พบว่าค่าการกระเพื่อมถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์เมื่อวัฏจักรงานเป็น 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 1-35 กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($I_{CBus,RMS}$) กับวัฏจักรงานของวงจรแปลงผันที่มี การขนาน 2 วงจร

ดังนั้นการนำวงจรทบแรงดันมาต่อขนานกันหลายๆ ตัว เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นการนำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มาต่อขนานกันจนถึง N ตัว วิธีการนี้เรียกว่า Interleaved Technique วิธีการนี้เป็นการเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสทางด้านเอาต์พุตให้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมและมีข้อดีคือสามารถลดกระแสกระเพื่อมทางด้านอินพุตได้อีกด้วย วิธีการขนานวงจรทบแรงดันจะมีการแยกการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัวให้มีมุมต่างเฟสเพื่อที่สวิตช์จะไม่ทำงานพร้อมกัน สามารถคำนวณได้จากสูตร

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

เมื่อ N คือจำนวนของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่นำมาต่อขนานกัน

จากสูตรการหามุมในการสวิตช์จะเห็นว่าเมื่อมีจำนวนวงจรต่อขนานมากขึ้นทำให้มุมจุดเริ่มต้นในการสวิตช์ก็น้อยลง เมื่อมีสวิตช์ที่นำกระแสมากขึ้นการกระเพื่อมของกระแสก็จะน้อยลงและกระแสก็จะไหลผ่านสวิตช์ทุกตัวที่ต่ออยู่ในวงจร ดังนั้นกระแสรวมทางด้านเอาต์พุตก็

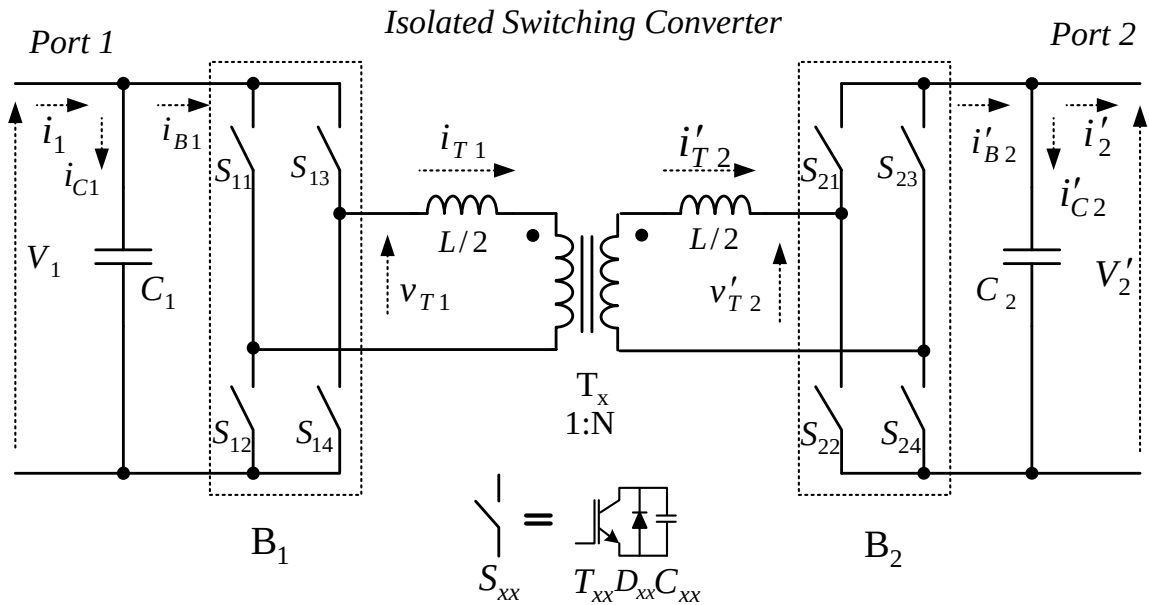
จะมากกว่าวงจรทบทแรงดันปกติทั่วไปและกระแสกระแสเฟืองยังน้อยลงด้วยนอกจากนี้วงจรทบทแรงดันแบบหลายเฟสนี้ยังมีข้อดี [14], [15] คือ

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

1.5 ทฤษฎีวงจรแปลงไฟแบบบริดจ์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวงจรแปลงผันแบบแอคทีฟบริดจ์คู่ (DUAL ACTIVE BRIDGE CONVERTERS: DAB) [16], [17] วงจรแปลงผันแบบแอคทีฟบริดจ์คู่ เป็นวงจรสวิตซ์ซึ่งที่มีการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง ต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรง 2 ฝั่ง เรียกว่า port 1 และ port 2 ผ่านวงจรฟูลบริดจ์สองวงจร ซึ่งประกอบไปด้วยสวิตซ์ที่ควบคุมได้ทั้ง 4 ตัว ในที่นี้จะเรียกว่าวงจร B_1 และ B_2 แสดงดังภาพที่ 1-36 และด้วยเหตุที่มีวงจรที่ควบคุมได้ทั้งสองด้านนี้ จึงทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าให้ไหลได้สองทิศทาง

วงจรแปลงผันแบบแอคทีฟบริดจ์คู่ใช้หม้อแปลง T_x ที่มีอัตรารอบปฐมภูมิต่อรอบทุติยภูมิอยู่ที่ $1 : N$ แต่ละฝั่งของวงจรต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน V_1 และ V_2' วงจรฟูลบริดจ์ทางด้านซ้ายมือของหม้อแปลงความถี่สูง T_x ประกอบด้วย สวิตซ์ 4 ตัว คือ S_{11} , S_{12} , S_{13} และ S_{14} ส่วนวงจรทางด้านขวามือวงจรแปลงผันแบบแอคทีฟฟูลบริดจ์ ประกอบด้วยสวิตซ์ S_{21} , S_{22} , S_{23} และ S_{24}



เงื่อนไขการสวิตช์

$T_{11} = T_{14}, T_{12} = T_{13}, T_{11} = /T_{12}$ หมายถึง / หมายถึง Inverse

$T_{21} = T_{24}, T_{22} = T_{23}, T_{21} = /T_{22}$

ภาพที่ 1-36 Dual active bridge converter

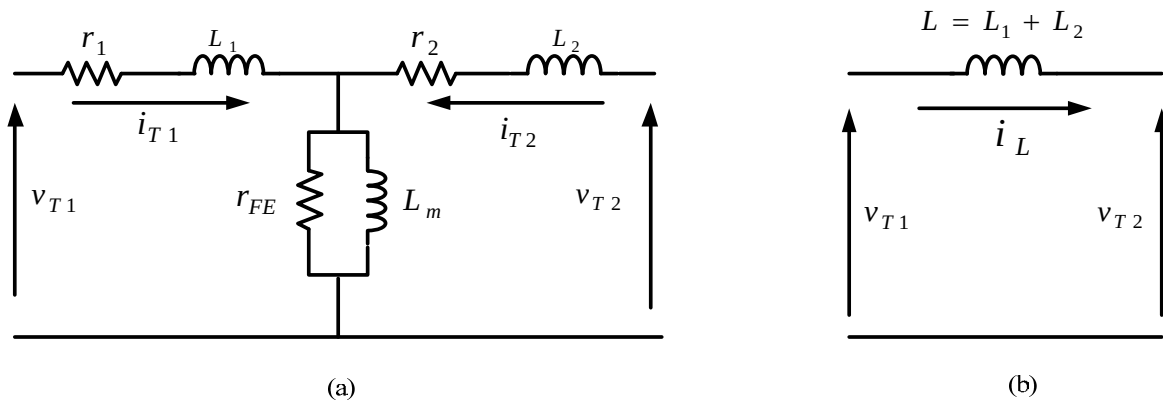
สมมติว่า การไหลของพลังงานไฟฟ้าจาก port 1 ไป port 2 วงจร B_1 จะกำเนิดรูปคลื่นแรงดันเป็นสี่เหลี่ยม v_{T1} ป้อนเข้าไปยังขดปฐมภูมิของหม้อแปลง T_x แรงดันทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลง v_{T2}' ถูกเรียงกระแสโดยวงจร B_2 และแรงดันที่เอาต์พุตจะมีค่าเฉลี่ยเป็น V_2'

ในทางอุดมคติแรงดัน v_{T1} และ v_{T2}' เป็นรูปสัญญาณแรงดันสี่เหลี่ยม ดิวตี้ไซเคิล 50% และค่าสูงสุดของแรงดันนั้นจะมีค่าเป็น V_1 และ V_2' ตามลำดับ ถ้าไม่มีแรงดันไฟตรงป้อนเข้าหม้อแปลงเป็นจำนวนมาก แกนของหม้อแปลงจะไม่อิ่มตัว ในการป้องกันการอิ่มตัวของแกนนี้อาจใช้วิธีต่อตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับขดลวดของหม้อแปลง หรือการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล

อุปกรณ์สวิตช์ ในวงจรแปลงผันฟูลบริดจ์ B_1 และ B_2 โดยปกติจะใช้ MOSFET หรือ IGBT ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่ง โดยอาจพิจารณาจากการสูญเสียทางกำลังไฟฟ้า

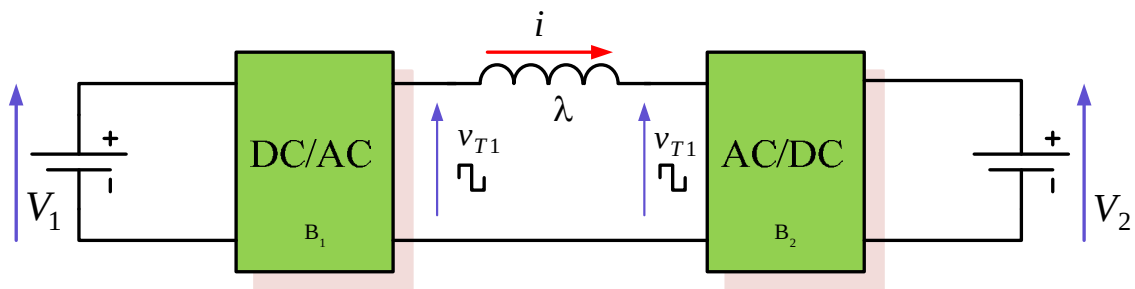
สวิตช์ S_{xx} ที่ใส่เข้าไป แสดงใน ภาพที่ 1-36 ประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ T_{xx} ไดโอด D_{xx} ที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุ C_{xx} ตัวเก็บประจุที่ต่อคร่อมสวิตช์นั้นเป็นตัวเก็บประจุแฝง

ในการพิจารณาวงจรนั้น สามารถที่จะย้ายพารามิเตอร์ของวงจรไปได้ทั้งทางขดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิของหม้อแปลง ในที่นี้จะพิจารณาย้ายไปทางด้านขดปฐมภูมิ จะได้ว่า $v_{T2} = v_{T2}' / N$; $V_2 = V_2' / N$; $i_{B2} = i_{B2}' N$; $i_{T2} = i_{T2}' N$ และ $i_{C2} = i_{C2}' N$ เมื่อ N คือ อัตราจำนวนรอบของหม้อแปลง



ภาพที่ 1-37 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบครบวงจร (a) วงจรสมมูลแบบง่ายของหม้อแปลง (b)

เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ หม้อแปลงความถี่สูง สามารถจำลองโดยใช้ วงจรสมมูล ที่แสดงใน ภาพที่ 1-37 (a) ตัวต้านทาน r_1 และ r_2 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดภายใน ทางด้าน ปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิตามลำดับ ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวด ตัวเหนี่ยวนำ L_m ตัวเหนี่ยวนำแมกนีไทซิง และ r_{FE} ค่าความต้านทานที่สูญเสียของแกน โดยทั่วไปตัวเหนี่ยวนำ L_m มักจะมีขนาดใหญ่กว่ากระแสรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำ และ r_{FE} มีความค่าสูง จนสามารถละทิ้งได้ ค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดตัวเหนี่ยวนำรวมเกิดจากการนำ L_1 และ L_2 มารวมกัน และถ้าค่าความต้านทาน r_1 และ r_2 มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับความต้านทานทางไฟฟ้ากระแสสลับจะสามารถสร้างวงจรสมมูลอย่างง่ายได้ ดังแสดงให้เห็นใน ภาพที่ 1-37(b)



ภาพที่ 1-38 วงจรสมมูลแบบง่ายของ DAB converter

ภาพที่ 1-38 แสดงวงจรสมมูลของวงจร DAB converter โดยใช้วงจรสมมูลแบบง่ายของ หม้อแปลงซึ่งถูกป้อนด้วยแรงดัน v_{T1} และ v_{T2} ที่สร้างจากวงจรบริดจ์ B_1 และ B_2 ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์ห้วงจร จะพิจารณาเป็นสองส่วนคือ 1) เมื่อกำลังไฟฟ้าไหลจาก port 1 ไป port 2 และ 2) แบบตรงกันข้าม โดยที่วงจร DAB converter จะมีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการ ควบคุมการเลื่อนเฟส (Phased Shift) โดยการปรับมุม δ

1) **เมื่อกำลังไฟฟ้าไหลจาก port 1 ไป port 2** พิจารณาการไหลของพลังงานที่จากแหล่งจ่าย V_1 ไป V_2 และสมมติว่า $V_1 > V_2$ จากรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในภาพที่ 1-39 สามารถแบ่งช่วงกระแสเพื่อคำนวณหาค่ากระแสไหลผ่านได้เป็นสามช่วงได้แก่

(a) $0 < \theta < \beta$

(b) $\beta < \theta < \delta$

(c) $\delta < \theta$

ในช่วง $0 < \theta < \beta$ จะได้ว่า

$$i(\theta) = \frac{1}{\lambda \cdot \omega} \left[(V_1 + V_2) \cdot \left(\theta - \frac{\delta}{2} \right) + (V_1 - V_2) \cdot \left(\frac{\delta - \pi}{2} \right) \right] \quad (1-6)$$

ในช่วง $\delta < \theta < \delta + \pi$ จะได้ว่า

$$i(\theta) = \frac{1}{\lambda \cdot \omega} \left[(V_1 - V_2) \cdot \left(\theta - \frac{\delta + \pi}{2} \right) + (V_1 + V_2) \cdot \left(\frac{\delta}{2} \right) \right] \quad (1-7)$$

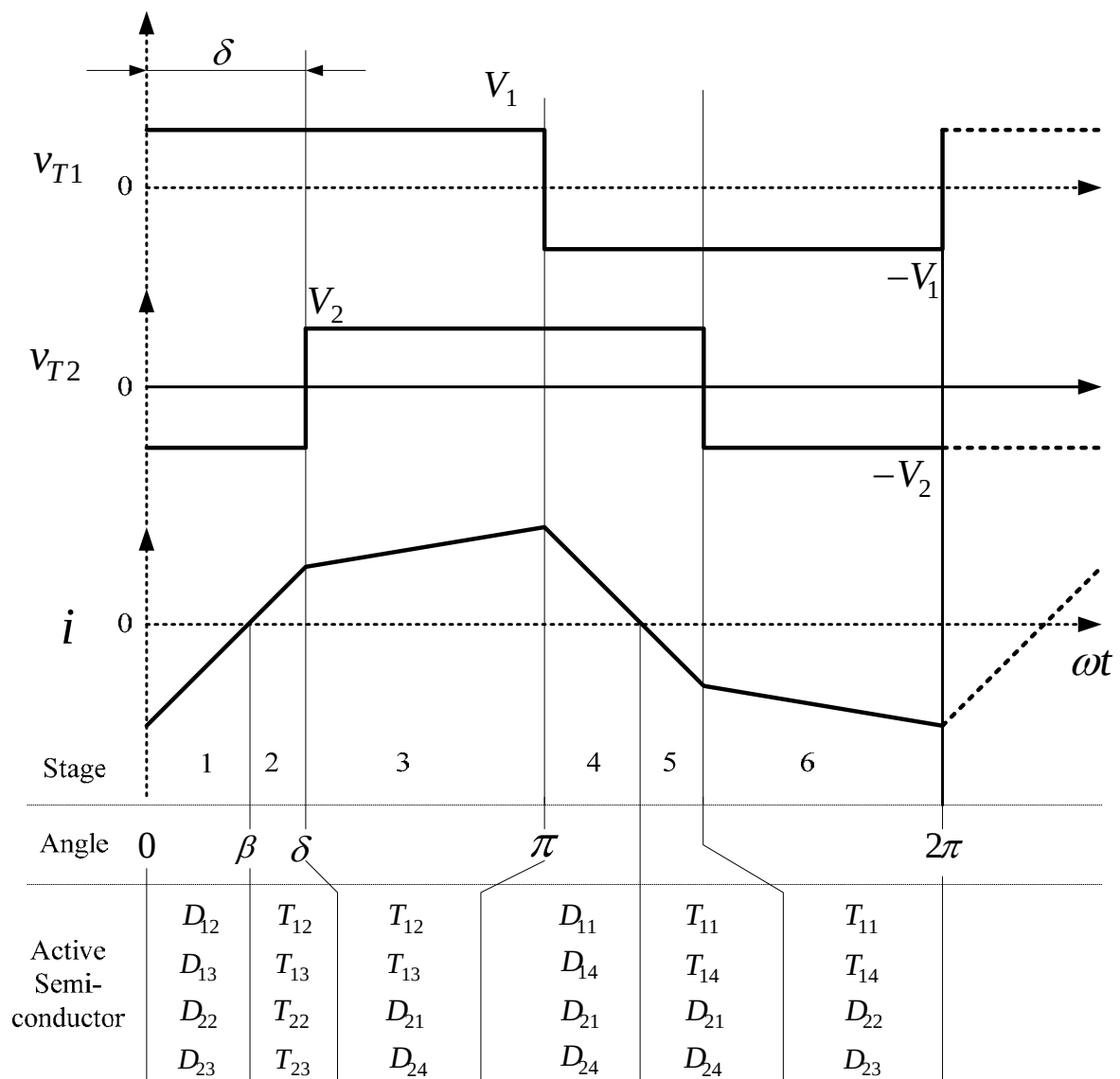
2) **เมื่อกำลังไฟฟ้าไหลจาก port 2 ไป port 1** พิจารณาการไหลของพลังงานที่จากแหล่งจ่าย V_2 ไป V_1 และสมมติว่า $V_1 > V_2$ สามารถแบ่งช่วงกระแสเพื่อคำนวณหาค่ากระแสไหลผ่านได้เป็นสามช่วงคล้ายกับในข้อ 1)

ในช่วง $-\delta < \theta < 0$ จะได้ว่า

$$i(\theta) = \frac{1}{\lambda \cdot \omega} \left[-(V_1 + V_2) \cdot \left(\theta - \frac{\delta}{2} \right) + (V_1 - V_2) \cdot \left(\frac{-\delta - \pi}{2} \right) \right] \quad (1-8)$$

ในช่วง $0 < \theta < \delta + \pi$ จะได้ว่า

$$i(\theta) = \frac{1}{\lambda \cdot \omega} \left[(V_1 - V_2) \cdot \left(\theta - \frac{\delta + \pi}{2} \right) - (V_1 + V_2) \cdot \left(\frac{\delta}{2} \right) \right] \quad (1-9)$$



ภาพที่ 1-39 กราฟของกระแสและแรงดัน ของ DAB converter
เมื่อเฟสของกระแสอยู่ระหว่างรูปกราฟของแรงดัน

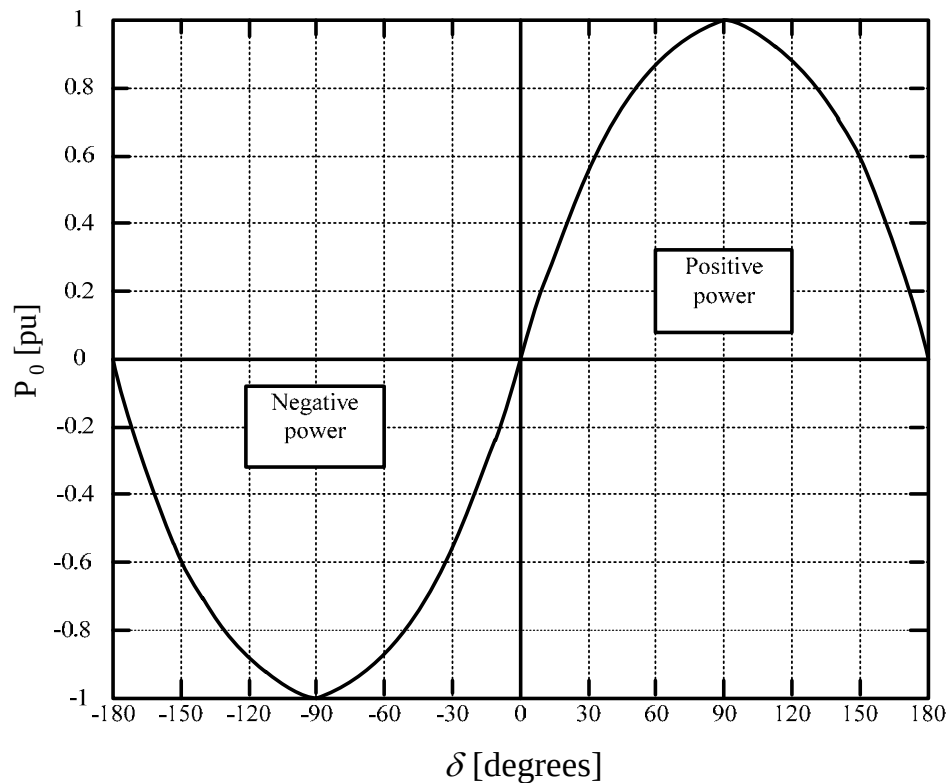
ในทั้งสองกรณี เมื่อวงจรอยู่ในสภาวะคงตัวจะได้ว่า

$$i(\theta) = -i(\theta \pm \pi) \quad (1-10)$$

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ไหลไปยัง port ทั้งสองจะได้ว่า

$$p(\theta) = \frac{1}{\pi} \int [i(\theta) \cdot v_2(\theta)] \cdot d\theta = \frac{V_1 \cdot V_2}{\lambda \cdot \omega} \cdot \delta \cdot \left(1 - \frac{|\delta|}{\pi}\right), \quad \forall(\delta) \in \left\{-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right\} \quad (1-11)$$

เมื่อนำสมอสมการ (2-11) มาพล็อตจะได้ดังภาพที่ 1-40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมให้ไหลไปได้ทั้งสองทิศทาง ด้วยการปรับมุมระหว่างแรงดันที่ขั้วหม้อแปลงทั้งสองฝั่ง และยังพบว่าที่มุม 90° องศา จะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และถ้ายิ่งเพิ่มขนาดของมุมไปอีกค่ากำลังไฟฟ้าจะลดลง



ภาพที่ 1-40 ค่าพลังงานแอคทีฟที่ฟังก์ชัน δ

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 สามารถแสดงในเทอมของตัวแปรแอคทีฟ y และสามารถแสดงในเทอมการอนุพันธ์ที่จำกัด โดยที่ไม่ปรากฏสมการอนุพันธ์ในระบบอีกเลย เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้น พิจารณาระบบไดนามิกส์แบบไม่เชิงเส้นในรูปแบบต่างๆ ไปดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{y}(t) = h(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad (1-12)$$

โดยที่

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T; \quad \mathbf{x} \in \mathcal{R}^n \quad (1-13)$$

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T; \quad \mathbf{u} \in \mathcal{R}^m \quad (1-14)$$

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T; \quad \mathbf{y} \in \mathcal{R}^m \quad (1-15)$$

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

ดังแสดงในภาพที่ 1-41 ระบบควบคุมแบบฟลัดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกเทียบเคียงคล้ายๆ กับระบบควบคุมที่สามารถควบคุมได้ในระบบเชิงเส้น ระบบจะแบนถ้าตัวแปรเอาต์พุต y มีเงื่อนไขดังนี้

- ตัวแปรเอาต์พุต y_i สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรสแตต x_i ตัวแปรอินพุต u_i และอนุพันธ์เทียบกับเวลาที่มีลำดับที่ α

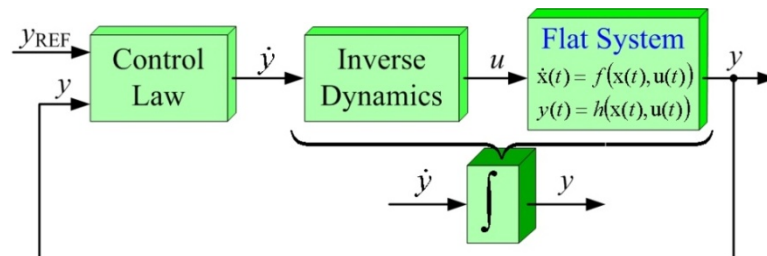
$$\mathbf{y} = \phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \dots, \mathbf{u}^{(\alpha)}) \quad (1-16)$$

- ตัวแปรสแตตทุกตัว x_i และตัวแปรอินพุตทุกตัว u_i สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรเอาต์พุต y_i และอนุพันธ์เทียบกับเวลาที่มีลำดับที่ β

$$\mathbf{x} = \phi(y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta)}) \quad (1-17)$$

$$\mathbf{u} = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta+1)}) \quad (1-18)$$

โดยที่ $\phi(\cdot)$, $\phi(\cdot)$, และ $\psi(\cdot)$ คือฟังก์ชันที่มีการแมปเป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 1-41 แนวคิดระบบควบคุมแบบฟลัด ซึ่ง y คือตัวแปรเอาต์พุต y_{REF} คือตัวแปรเอาต์พุตที่อ้างอิง u คือตัวแปรอินพุตที่ควบคุม

ถ้าตัวแปรเอาต์พุตที่เราสนใจถูกพิสูจน์ได้ว่ามีคุณสมบัติที่เป็นตัวแปรที่แบน y ตัวแปรเอาต์พุตที่เราอ้างอิง y_{REF} ก็จะตรงไปตรงมา ไดนามิกส์ของค่าผิดพลาดสามารถคำนวณได้ โดยที่มีการกำเนิดสัญญาณตัวแปรอินพุตตัวใหม่ v_i เกิดขึ้น (ดังภาพที่ 1-41) คือ

$$0 = (y_i^{(\beta+1)} - y_{i,REF}^{(\beta+1)}) + K_\beta (y_i^\beta - y_{i,REF}^\beta) + \dots + K_0 (y_i - y_{i,REF}) \quad (1-19)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} v_i &= y_{i,REF}^{(\beta+1)} + K_\beta (y_{i,REF}^\beta - y_i^\beta) + \dots + K_0 (y_{i,REF} - y_i) \\ &= y_i^{(\beta+1)} \end{aligned} \quad (1-20)$$

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

$$u = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^\beta, v) \quad (1-21)$$

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

$$p(s) = s^{\beta+1} + \lambda_\beta s^\beta + \dots + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 \quad (1-22)$$

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

$$e_i^{(\beta+1)} + K_\beta e_i^{(\beta)} + \dots + K_0 e_i = 0 \quad (1-23)$$

ดังนั้น การเลือกค่าที่เหมาะสมของตัวแปรของตัวควบคุมกระทำได้โดยกำหนดตำแหน่งรากตามสมการลักษณะสมบัติ (Characteristic Equation)



ในการทำการวิจัยเรื่อง ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและแสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์ มีขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมด 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

2.2 การบริหารจัดการพลังงานในโรงไฟฟ้า

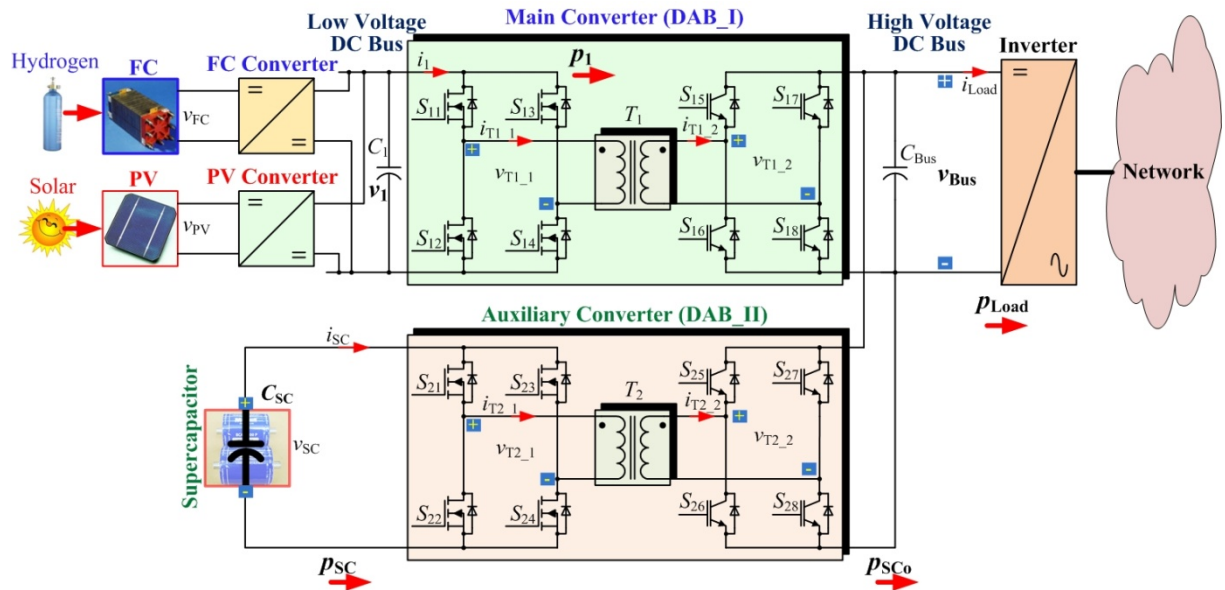
2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

2.1.1 วงจรกำลัง

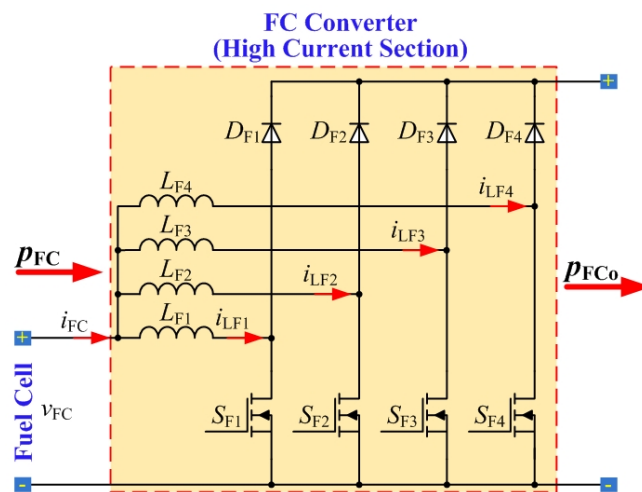
โครงสร้างการต่อวงจรกำลังของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมนี้แสดงได้ดังภาพที่ 2-1 ถึง 2-3 ประกอบด้วย

- 1) ตัวแปลงไฟหลักแบบ Dual Active Bridge DAB_I ควบคุมโดยมุมเลื่อนเฟส δ_1 ($0 \leq \delta_1 \leq 90^\circ$) เพื่อส่งกำลังไฟฟ้า P_1 จาก Low Voltage DC Bus ไปยัง High Voltage DC Bus
- 2) ตัวแปลงไฟสำรองแบบ Dual Active Bridge DAB_II ควบคุมโดยมุมเลื่อนเฟส δ_2 ($-90^\circ \leq \delta_2 \leq +90^\circ$) เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปกลับ P_{SC} ระหว่างซูเปอร์คาปาซิเตอร์กับ High Voltage DC Bus
- 3) ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (FC converter) คือวงจรบูสที่ขนานกัน 4 ชุด [21]
- 4) ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ (PV converter) คือวงจรบูสที่ขนานกัน 4 ชุด

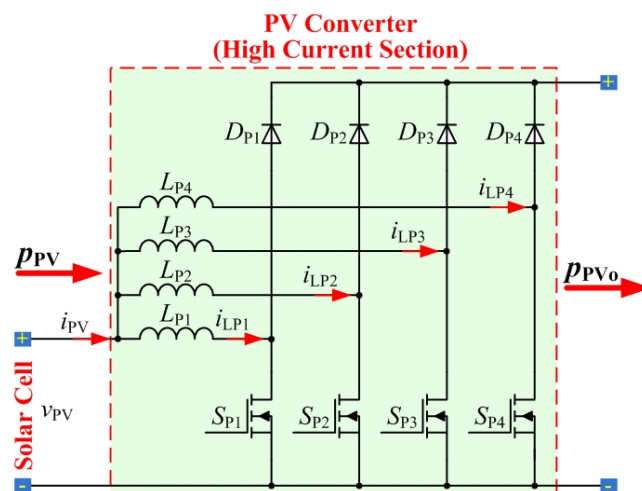
ซึ่ง $p_{Load} (= v_{Bus} \times i_{Load})$, v_{Bus} , และ i_{Load} คือกำลัง แรงดันและกระแสของ High Voltage DC Bus ตามลำดับ $p_1 (= v_1 \times i_1)$, v_1 , และ i_1 คือกำลัง แรงดันและกระแสของ Low Voltage DC Bus ตามลำดับ $p_{FC} (= v_{FC} \times i_{FC})$, v_{FC} และ i_{FC} คือกำลัง แรงดันและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง ตามลำดับ $p_{PV} (= v_{PV} \times i_{PV})$, v_{PV} และ i_{PV} คือกำลัง แรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ ตามลำดับ $p_{SC} (= v_{SC} \times i_{SC})$, v_{SC} , และ i_{SC} คือกำลัง แรงดันและกระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ตามลำดับ p_{FCo} , p_{PVo} , และ p_{SCo} คือกำลังเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ตามลำดับ



ภาพที่ 2-1 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน “ตัวแปลงไฟเชื่อมต่อทางแม่เหล็กสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนและแสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายสำรองโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์”



ภาพที่ 2-2 ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง



ภาพที่ 2-3 ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อเป็นการป้องกันและการทำงานที่มีความเร็วสูง ตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ DAB_I และ DAB_II จะถูกควบคุมด้วยวงปิดของการควบคุมกำลังไฟฟ้าของแต่ละตัว เพื่อแน่ใจว่าระบบทำงานที่มีเสถียรภาพ (Stability) ความเร็วของวงปิดระบบควบคุมกำลังซึ่งเป็นระบบควบคุมวงในสุด (inner regulation loops) จะต้องทำงานที่ความเร็วสูงกว่าระบบควบคุมวงปิดของระบบควบคุมวงนอก (outer control loops) [22] ระบบควบคุมนี้จะรับคำสั่งอ้างอิง (References) ที่สำคัญคือ

- 1). กำลังคำสั่งของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ p_{SCREF} (DAB_II)
- 2). กำลังคำสั่ง p_{1REF} สำหรับ DAB_I
- 3). กำลังคำสั่งของเซลล์เชื้อเพลิง p_{FCREF} และ
- 4). กำลังคำสั่งของเซลล์แสงอาทิตย์ p_{PVREF}

กำลังไฟฟ้าคำสั่งทั้งสี่นี้จะถูกกำเนิดมาจากตัวควบคุมบริหารจัดการพลังงานทั้งระบบ ซึ่งจะนำเสนอต่อไปนี้

2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแหล่งจ่ายไฟแบบผสม

เราพิจารณาให้กระแสของเซลล์เชื้อเพลิง กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสของ DAB_I และกระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ DAB_II ทำงานตามกระแสคำสั่งอย่างรวดเร็ว ดังนั้น

$$i_{FC} = i_{FCREF} = \frac{P_{FC}}{v_{FC}} = \frac{P_{FCREF}}{v_{FC}} \quad (2-1)$$

$$i_{PV} = i_{PVREF} = \frac{P_{PV}}{v_{PV}} = \frac{P_{PVREF}}{v_{PV}} \quad (2-2)$$

$$i_1 = i_{1REF} = \frac{P_1}{v_1} = \frac{P_{1REF}}{v_1} \quad (2-3)$$

$$i_{SC} = i_{SCREF} = \frac{P_{SC}}{v_{SC}} = \frac{P_{SCREF}}{v_{SC}} \quad (2-4)$$

เป็นผลทำให้เซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ DAB_I และ DAB_II (ซูเปอร์คาปาซิเตอร์) ทำงานเป็นแหล่งจ่ายกำลังที่ควบคุมได้ (Controlled power sources) เราพิจารณาให้ค่าสูญเสียในตัวแปลงไฟแต่ละตัวเป็นตัวต้านทานที่มีค่าสูญเสียคงที่คือ r_{FC} , r_{PV} , r_1 และ r_{SC} ของตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง ของตัวแปลงไฟของเซลล์แสงอาทิตย์ ของตัวแปลงไฟ DAB_I และของตัวแปลงไฟของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ตามลำดับ

ระบบนี้ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ 3 ตัวคือ C_{BUS} , C_{SC} และ C_1 ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่คาปาซิเตอร์แต่ละตัว สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_{\text{Bus}} = \frac{1}{2} C_{\text{Bus}} \cdot v_{\text{Bus}}^2 \quad (2-5)$$

$$E_{\text{SC}} = \frac{1}{2} C_{\text{SC}} \cdot v_{\text{SC}}^2 \quad (2-6)$$

$$E_1 = \frac{1}{2} C_1 \cdot v_1^2 \quad (2-7)$$

ขณะที่พลังงานสะสมรวม (E_T) ที่เก็บอยู่ในคาปาซิเตอร์ที่บัสไปตรง (C_{Bus}) และในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (C_{SC}) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_T = \frac{1}{2} C_{\text{Bus}} v_{\text{Bus}}^2 + \frac{1}{2} C_{\text{SC}} v_{\text{SC}}^2 \quad (2-8)$$

ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ของพลังงานไฟฟ้าที่ High Voltage DC Bus (E_{Bus}) กับ p_{1o} , p_{SCo} , และ p_{Load} ได้ดังนี้

$$\dot{E}_{\text{Bus}} = p_{1o} + p_{\text{SCo}} - p_{\text{Load}} \quad (2-9)$$

ซึ่ง

$$p_{1o} = p_1 - r_1 \left(\frac{p_1}{v_1} \right)^2 \quad (2-10)$$

$$p_{\text{SCo}} = p_{\text{SC}} - r_{\text{SC}} \left(\frac{p_{\text{SC}}}{v_{\text{SC}}} \right)^2 \quad (2-11)$$

$$p_{\text{Load}} = v_{\text{Bus}} \cdot i_{\text{Load}} = \sqrt{\frac{2E_{\text{Bus}}}{C_{\text{Bus}}}} \cdot i_{\text{Load}} \quad (2-12)$$

$$p_{\text{SC}} = v_{\text{SC}} \cdot i_{\text{SC}} = \sqrt{\frac{2E_{\text{SC}}}{C_{\text{SC}}}} \cdot i_{\text{SC}} \quad (2-13)$$

เช่นเดียวกัน สามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ของพลังงานไฟฟ้าที่ Low Voltage DC Bus (E_1) กับ p_{FCo} , p_{PVo} , และ p_1 ได้ดังนี้

$$\dot{E}_1 = p_{\text{FCo}} + p_{\text{PVo}} - p_1 \quad (2-14)$$

ซึ่ง

$$p_{\text{FCo}} = p_{\text{FC}} - r_{\text{FC}} \left(\frac{p_{\text{FC}}}{v_{\text{FC}}} \right)^2 \quad (2-15)$$

$$p_{PV0} = p_{PV} - r_{PV} \left(\frac{p_{PV}}{v_{PV}} \right)^2 \quad (2-16)$$

$$p_1 = v_1 \cdot i_1 = \sqrt{\frac{2E_1}{C_1}} \cdot i_1 \quad (2-17)$$

2.2 การบริหารจัดการพลังงานในระบบจ่ายไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

2.2.1 พลังงานสมดุล

วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือความมีเสถียรภาพ (stability) ความแข็งแกร่ง (robustness) ประสิทธิภาพ (high overall efficiency) และการทำงานที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดและชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ระบบควบคุมแบบหลายตัวแปรนี้จึงต้องมี

- 1). คำสั่งอ้างอิงของแรงดันที่ High-Voltage DC Bus (v_{BusREF}) (แทนพลังงานที่บัสไฟตรง (E_{Bus}) ที่เราเรียกว่า “การมีเสถียรภาพที่บัสไฟตรง DC link stabilization”)
- 2). คำสั่งอ้างอิงของแรงดันที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (v_{SCREF}) (แทนพลังงานที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (E_{SC}) ที่เราเรียกว่า “supercapacitor state-of-charge SOC”)

งานวิจัยนี้กำหนดให้เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกควบคุมเป็นแหล่งจ่ายหลักที่หนึ่ง เซลล์เชื้อเพลิงทำงานเป็นแหล่งจ่ายจ่ายไฟเมื่อพลังงานในสถานะอยู่ตัวไม่พอกจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งพลังงานที่มีความเร็วสูงมากๆ จะช่วยจ่ายไฟช่วงไดนามิกส์สูงๆ ดังนั้นหลักการบริหารจัดการพลังงานในระบบคือให้

- 1). ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ C_{SC} จ่ายไฟเพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัสไฟตรง High-Voltage DC Bus ผ่านการควบคุม DAB_II
- 2). คาปาซิเตอร์ C_1 จ่ายไฟเพื่อชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ผ่านการควบคุม DAB_I
- 3). โซลาร์เซลล์และเซลล์เชื้อเพลิง (เป็นเครื่องกำเนิดพลังงานที่ช้ากว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์) ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่บัสไฟตรง Low-Voltage DC Bus

2.2.2 การควบคุมแรงดันที่บัสไฟตรง High-Voltage DC Bus

เพื่อยืนยันการมีคุณสมบัติแบบ *flatness* ดังได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 1.6 จะถูกพิสูจน์ดังต่อไปนี้ เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟที่บัสไฟตรง บนพื้นฐานของทฤษฎีการควบคุมแบบ *flatness* ตัวแปรเอาต์พุต (y) ตัวแปรควบคุมอินพุต (u) และตัวแปร สเตท (x) ถูกกำหนดดังนี้

$$y_1 = E_{Bus} \quad (2-18)$$

$$u_1 = p_{SCREF} \quad (2-19)$$

$$x_1 = v_{Bus} \quad (2-20)$$

ดังนั้นตัวแปรสแตท x_1 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_1 = \sqrt{\frac{2y_1}{C_{\text{Bus}}}} = \phi_1(y_1) \quad (2-21)$$

จากสมการ (2-9) ตัวแปรอินพุต (u) สามารถคำนวณได้จากตัวแปรเอาต์พุตตัว (y) และอนุพันธ์เทียบกับเวลาคือ

$$u_1 = 2p_{\text{SCLim}} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\dot{y}_1 + \sqrt{\frac{2y_1}{C_{\text{Bus}}}} \cdot i_{\text{Load}} - p_{1o}}{p_{\text{SCLim}}}} \right] \quad (2-22a)$$

$$= \psi_1(y_1, \dot{y}_1) = p_{\text{SCREF}}$$

$$u_1 = \dot{y}_1 + p_{\text{Load}} - p_1|_{\text{Loss}=0} \quad (2-22b)$$

$$= p_{\text{SCREF}}$$

$$p_{\text{SCLim}} = \frac{v_{\text{SC}}^2}{4r_{\text{SC}}} \quad (2-23)$$

จากสมการที่ (1.20) กฎการควบคุมพลังงานแสดงได้ดังนี้ [23], [24]

$$v_1 = \dot{y}_1 = \dot{y}_{1\text{REF}} + K_{11}(y_{1\text{REF}} - y_1) + K_{12} \int_0^t (y_{1\text{REF}} - y_1) d\tau \quad (2-24)$$

ซึ่ง $y_{1\text{REF}}$ คือคำสั่งอ้างอิงของตัวแปรเอาต์พุตตัวที่ 1 (พลังงานที่คาปาซิเตอร์ที่บัสไฟตรง)

จากสมการที่ (2-23) ถ้ากำหนดให้ $e_1 = y_1 - y_{1\text{REF}}$, $K_{11} = 2\zeta\omega_n$ และ $K_{12} = \omega_n^2$ จะได้

$$\ddot{e}_1 + 2\zeta\omega_n \cdot \dot{e}_1 + \omega_n^2 \cdot e_1 = 0 \quad (2-25)$$

แทน $\dot{y}_1$ ลงในสมการที่ (2-22a) จะได้สมการในเทอมของการควบคุมแบบป้อนกลับ เราอาจจะเรียกว่า “inverse dynamics”

จากสมการที่ (2-25) เห็นได้ชัดว่าระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแน่นอนสำหรับค่า K_{11} , $K_{12} > 0$ อย่างไรก็ตาม บนพื้นฐานของระบบควบคุมเป็นชั้นๆ (cascade control structure) และความถี่ของการสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ω_s) วงควบคุมชั้นนอก (ในที่นี้คือการควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรง) จะต้องทำงานที่ cut-off frequency $\omega_E \ll \omega_C$ ซึ่ง ω_C คือ cut-off frequency ของระบบควบคุมของวงควบคุมกำลังจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์ซึ่งเป็นวงชั้นในนั่นเองและ $\omega_C \ll \omega_s$ เมื่อตัวแปรเอาต์พุตมีเสถียรภาพ ระบบควบคุมทั้งหมดก็จะมีเสถียรภาพไปด้วยเพราะตัวแปรทั้งหมดสามารถแสดงในเทอมของ differential flatness

2.2.3 การควบคุมแรงดันที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (ชาร์จซูปเปอร์คาปาซิเตอร์) เช่นเดียวกัน ถ้ากำหนดให้

$$y_2 = E_T \quad (2-26)$$

$$u_2 = p_{1REF} \quad (2-27)$$

$$x_2 = v_{SC} \quad (2-28)$$

ดังนั้นตัวแปรสแตท x_2 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_2 = \sqrt{\frac{2(y_2 - E_{Bus})}{C_{SC}}} = \varphi_2(y_2) \quad (2-29)$$

ตัวแปรอินพุต (u) สามารถคำนวณได้จากตัวแปรเอาต์พุตตัว (y) และอนุพันธ์เทียบกับเวลาคือ

$$u_2 = 2p_{1Lim} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\dot{y}_2 + \sqrt{\frac{2y_2 - C_{SC} \cdot v_{SC}^2}{C_{Bus}}}}{p_{1Lim}}} \right] \quad (2-30)$$

$$= \psi_2(y_2, \dot{y}_2) = p_{1REF}$$

$$p_{1Lim} = \frac{v_1^2}{4r_1} \quad (2-31)$$

ขณะที่ p_{SCMax} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกจำกัดจากตัวแปลงไฟ DAB_II
จากสมการที่ (1.20) กฎการควบคุมพลังงานแสดงได้ดังนี้ [23], [24]

$$v_2 = \dot{y}_2 = \dot{y}_{2REF} + K_{21}(y_{2REF} - y_2) \quad (2-32)$$

ซึ่ง y_{2REF} คือคำสั่งอ้างอิงของตัวแปรเอาต์พุตตัวที่ 2 แทน $\dot{y}_2$ ลงในสมการที่ (2-30) จะได้สมการในเทอมของการควบคุมแบบป้อนกลับ “inverse dynamics” เนื่องจากระบบนี้มี 3 วงควบคุมดังนั้น p_{1REF} จะต้องมีการเลือกจำกัดไดนามิกส์ให้ช้ากว่า p_{SCREF} โดยใช้ตัวกรองลำดับที่ 2 แสดงได้ดังนี้

$$D_{p1}(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_{n1}}\right)^2 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n1}}s + 1} \quad (2-33)$$

ซึ่ง ω_{n1} และ ζ_1 คือตัวแปรการควบคุม

2.2.4 การควบคุมแรงดันที่ Low-Voltage DC Bus

เช่นเดียวกัน ถ้ากำหนดให้

$$y_3 = E_1 \quad (2-34)$$

$$u_3 = p_{TREF} = p_{FCREF} + p_{PVREF} \quad (2-35)$$

$$x_3 = v_1 \quad (2-36)$$

ดังนั้นตัวแปรสแตท x_3 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_3 = \sqrt{\frac{2y_3}{C_{SC}}} = \phi_3(y_3) \quad (2-37)$$

ตัวแปรอินพุต (u) สามารถคำนวณได้จากตัวแปรเอาต์พุตตัว (y) และอนุพันธ์เทียบกับเวลาคือ

$$u_3 = 2p_{TLim} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\dot{y}_3 + \sqrt{\frac{2y_3}{C_1}} \cdot i_1}{p_{TLim}}} \right] \quad (2-38)$$

$$= \psi_3(y_3, \dot{y}_3) = p_{TREF}$$

$$p_{TLim} = \frac{v_T^2}{4r_T} \quad (2-39)$$

ขณะที่ p_{TMax} คือเทียบเคียงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกจำกัดจากตัวแปลงไฟของโซลาร์เซลล์ และเซลล์เชื้อเพลิง v_T คือแรงดันไฟฟ้าเทียบเคียงจากแหล่งจ่ายไฟจากโซลาร์เซลล์ และเซลล์เชื้อเพลิงและ r_T คือค่าตัวต้านทานเทียบเคียงในตัวแปลงไฟของโซลาร์เซลล์ และเซลล์เชื้อเพลิง

อันที่จริงแล้ว

$$p_{TMax} = p_{FCMax} + p_{PVMax} \quad (2-40)$$

ซึ่ง p_{FCMax} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์เชื้อเพลิงและ p_{PVMax} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากโซลาร์เซลล์ จากสมการที่ (1.20) กฎการควบคุมพลังงานแสดงได้ดังนี้ [23], [24]

$$v_3 = \dot{y}_3 = \dot{y}_{3REF} + K_{31}(y_{3REF} - y_3) \quad (2-41)$$

ซึ่ง y_{3REF} คือคำสั่งอ้างอิงของตัวแปรเอาต์พุตตัวที่ 3 แทน $\dot{y}_3$ ลงในสมการที่ (2-30) จะได้สมการในเทอมของการควบคุมแบบป้อนกลับ “inverse dynamics”

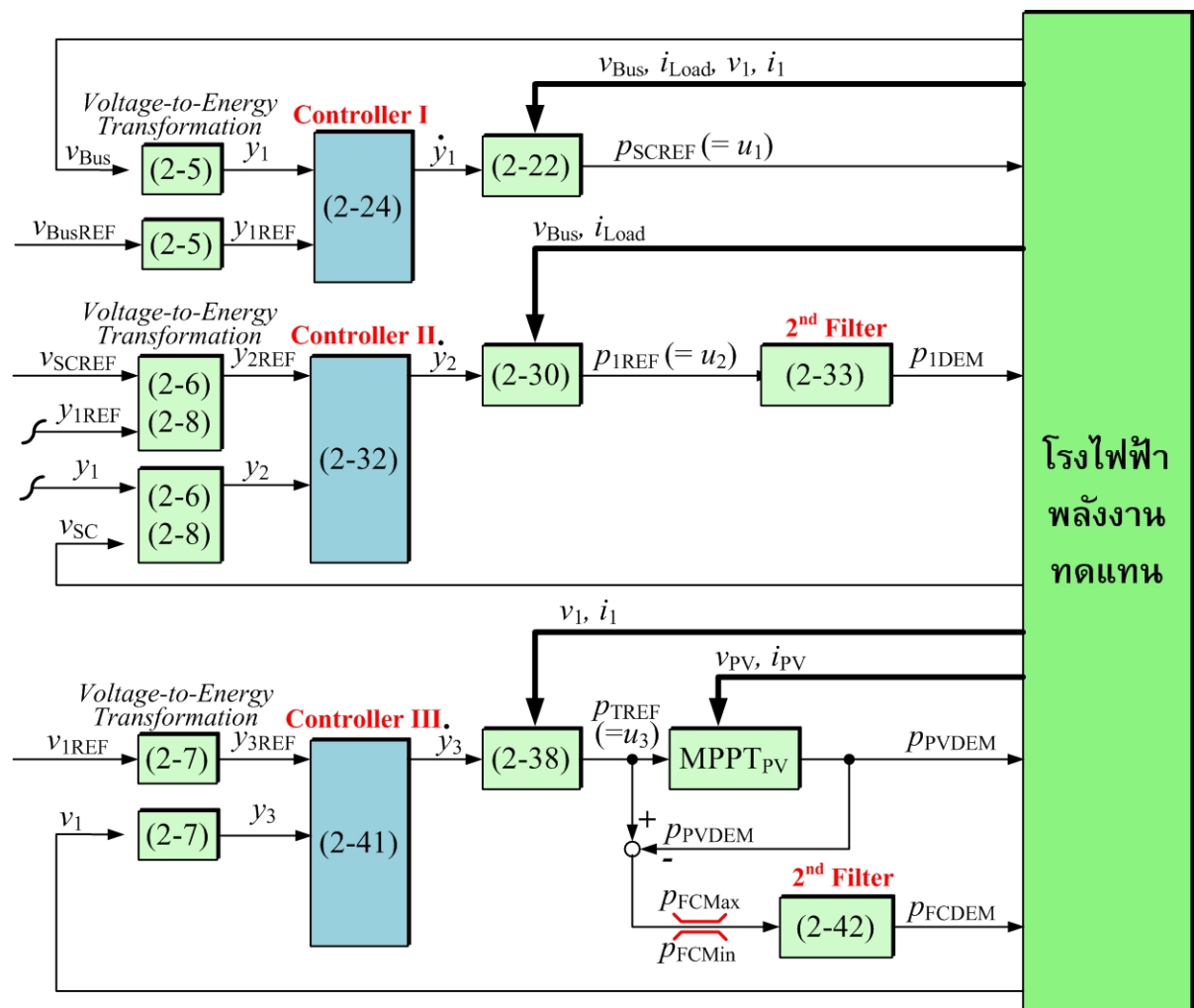
2.2.5 สรุประบบควบคุมหลายตัวแปรแบบไม่เชิงเส้น

ภาพที่ 2-4 ได้อธิบายถึงแนวคิดระบบควบคุมที่ได้นำเสนอสำหรับแหล่งจ่ายไฟจากพลังงานทดแทนที่ได้อธิบายข้างบน

- กฎการควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรง High-Voltage DC Bus สร้างกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับ DAB_II (ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ p_{SCREF})
- กฎการควบคุมสำหรับชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ สร้างกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับควบคุม DAB_I p_{1REF}
- กฎการควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรง Low-Voltage DC Bus สร้างกำลังไฟฟ้าอ้างอิงรวม p_{TREF}
 - อย่างแรก สัญญาณ p_{TREF} นี้จะถูกพิจารณาให้เป็นกำลังอ้างอิงสำหรับโซล่าเซลล์ p_{PVREF} สัญญาณนี้จะถูกจำกัดไม่ให้เกินกำลังไฟฟ้าสูงสุด p_{PVMax} ด้วยตัวติดตามกำลังไฟฟ้า (maximum power point tracking MPPT_{PV}) แสดงดังรูปที่ 2-5 [25], [26], [27] สัญญาณที่ออกจาก MPPT_{PV} เรียกว่า p_{PVDEM}
 - อย่างที่สอง ความแตกต่างระหว่าง p_{PVDEM} กับ p_{TREF} คือกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง p_{FCREF} สัญญาณนี้จะถูกจำกัดไม่ให้เกินกำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{FCMax} และต่ำสุด P_{FCMin} (ปกติ $P_{FCMin} = 0$) ในที่นี้ตัวห่นวงลำดับที่ 2 ($D_{FC}(s)$) ถูกเลือกสำหรับการจำกัดไดนามิกสของเซลล์เชื้อเพลิง (FC power dynamic limitation) [28] , [29], [30] แสดงได้ดังนี้

$$D_{FC}(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_{n2}}\right)^2 + \frac{2\zeta_2}{\omega_{n2}}s + 1} \quad (2-42)$$

- ซึ่ง ω_{n2} และ ζ_2 คือตัวแปรการควบคุม สัญญาณที่ออกจาก $D_{FC}(s)$ เรียกว่า p_{FCDEM}



ภาพที่ 2-4 ไดอะแกรมระบบควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบผสม

```

BEGIN
  READ  $p_{PVDEM}(t)$ 
  READ  $v_{PV}(t)$ 
  READ  $i_{PV}(t)$ 
   $p_{PV}(t) = v_{PV}(t) \times i_{PV}(t);$ 
   $p_{PV}(t-\Delta t) = v_{PV}(t-\Delta t) \times i_{PV}(t-\Delta t);$ 

  IF  $p_{PV}(t-\Delta t) \geq p_{PV}(t)$  THEN
    IF  $i_{PV}(t-\Delta t) \geq i_{PV}(t)$  THEN
       $i_{PVMAX}(t) = i_{PV}(t) + \Delta I_{PV};$ 
    ELSE
       $i_{PVMAX}(t) = i_{PV}(t) - \Delta I_{PV};$ 
    ENDIF

  ELSE
    IF  $i_{PV}(t-\Delta t) \geq i_{PV}(t)$  THEN
       $i_{PVMAX}(t) = i_{PV}(t) - \Delta I_{PV};$ 
    ELSE
       $i_{PVMAX}(t) = i_{PV}(t) + \Delta I_{PV};$ 
    ENDIF

  ENDIF

   $p_{PVMAX}(t) = v_{PV}(t) \times i_{PVMAX}(t);$ 
   $p_{PVREF}(t) = \min[p_{PVDEM}(t), p_{PVMAX}(t)];$ 
  % Note: Minimum Function
   $v_{PV}(t-\Delta t) = v_{PV}(t);$ 
   $i_{PV}(t-\Delta t) = i_{PV}(t);$ 
END

```

ภาพที่ 2-5 ฟังก์ชันคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูงสุดของโซล่าเซลล์ MPPT_{PV} ซึ่ง ΔI_{PV} คือความ
ละเอียดของกระแสที่กำหนด และ Δt คือเวลาชຸ່มสำหรับการคำนวณ