

ในการทำการวิจัยเรื่องระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมด้วยเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่นั้น มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1.1 เซลล์เชื้อเพลิง

1.2 เซลล์แสงอาทิตย์

1.3 แบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์

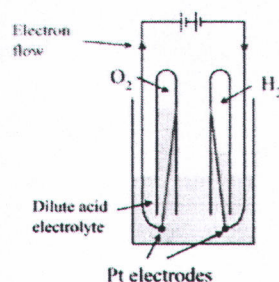
1.4 วงจรแปลงไฟแบบทิศทางเดียวสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แสงอาทิตย์

1.5 วงจรแปลงไฟแบบสองทิศทางสำหรับแบตเตอรี่

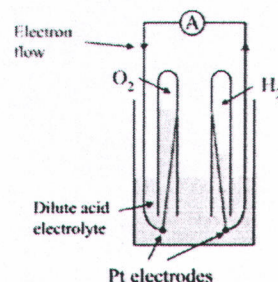
1.6 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)

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 โดยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน และเพื่อที่จะทดสอบทฤษฎีนี้ เขาได้วางแผ่นแพลตินัม (Platinum) 2 แผ่น ไว้ในขวดที่ปิดแยกกัน ขวดหนึ่งมีไฮโดรเจนและอีกขวดมีออกซิเจน เมื่อขวดสองอันนี้ถูกจุ่มรวมกันด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองและเกิดน้ำขึ้นในขวดที่บรรจุก๊าซทั้งสอง ดังแสดงในภาพที่ 1-1 เพื่อที่จะเพิ่มแรงดันต่ำที่ผลิตออกมานั้น เขาได้ต่ออุปกรณ์เหล่านี้ในแบบอนุกรมกันและเขาได้เรียกอุปกรณ์นี้ในขณะนั้นว่า “ก๊าซแบตเตอรี่” ซึ่งเป็นต้นแบบของเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบัน



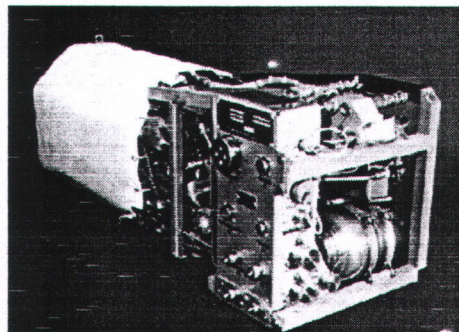
The electrolysis of water



The electrolysis of water is reversible

ภาพที่ 1-1 แนวคิดเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบที่คิดค้นโดย Sir William Robert Grove

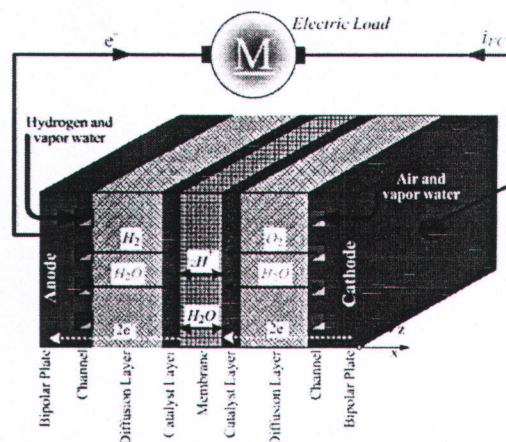
เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์แปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่ก่อมลพิษ พลังงาน (อิเล็กตรอน) จะถูกส่งออกมาเมื่อเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) ทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศและทำให้เกิดน้ำบริสุทธิ์และความร้อนควบคู่ตามมา ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้เกิดขึ้นและพลังงานถูกส่งออกมาในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าคือไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต่ำพร้อมกับความร้อน เซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงและสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ที่ใช้งาน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่มีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการผลิต และมีขนาดเล็ก คือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์เมมเบรน (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

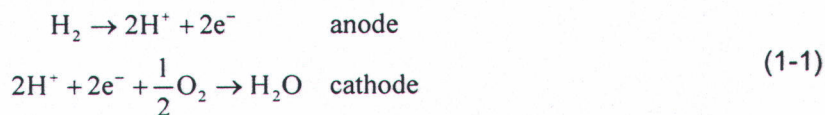
1.1.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แสดงในภาพที่ 1-3 [3] ก๊าซซึ่งไหลมาตามทิศทาง x มาจากช่องที่ถูกออกแบบเป็นแผ่นแบบสองขั้ว (หนา 1-10 mm) ไอน้ำถูกนำมารวมกับก๊าซเพื่อให้ความชื้นกับเมมเบรน ชั้นการกระจายตัว (diffusion layers: 100-500 μm) มีไว้เพื่อการแพร่กระจายที่ดีของก๊าซไปยังชั้นปฏิกิริยา (reaction layers : 5-50 μm) ชั้นเหล่านี้ได้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าของเซลล์ซึ่งทำด้วยแพลตินัมทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 1-3 ชั้นต่างๆ ของเซลล์พื้นฐานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

การทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนและออกซิเจนคือ



ถูกแยกจากกันโดยเมมเบรน (20-200 μm) ซึ่งนำโปรตอนจากขั้วแอโนด (Anode) ไปขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งอิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ การเคลื่อนที่ของโปรตอนนี้ได้ดึงโมเลกุลของน้ำมาด้วยทำให้เกิดการกระจายของความชื้นในเมมเบรน โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่กระจายไปได้ทั้งสองทิศทางภายในเมมเบรน ตามฝั่งที่ก๊าซมีความชื้นมากและตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กันโดยตรงกับการไหลของโปรตอนผ่านเมมเบรนและโดยตรงกับการปริมาณน้ำที่ผลิตในฝั่งแคโทด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในฝั่งแอโนดนั้นไม่สามารถผ่านเมมเบรนและได้ถูกใช้ในวงจรไฟฟ้าภายนอกเช่น มอเตอร์ หลอดไฟ อื่นๆ ก่อนย้อนกลับสู่แคโทด การไหลของอิเล็กตรอนหรือเรียกว่ากระแสไฟฟ้านั้น สัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

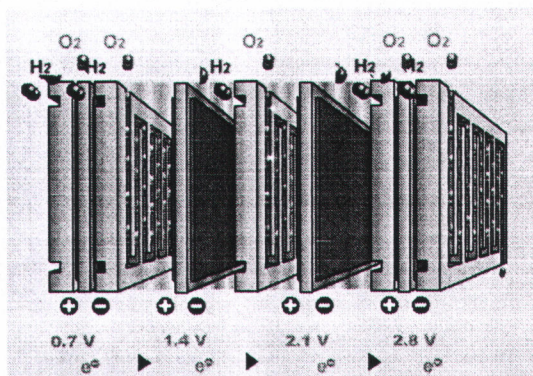
$$J_{\text{H}^+} = \frac{i}{F} \quad (1-2)$$

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday)

ค่าแรงดันเอนทัลปีของเซลล์หนึ่งเซลล์มาจากพลังงานปลดปล่อยอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy ΔG) คือ

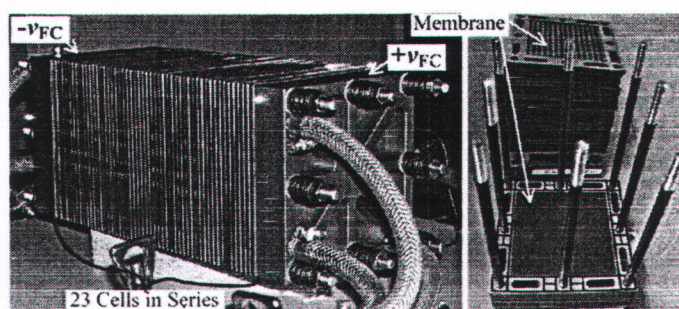
$$V_{\text{rev}} = -\frac{\Delta G}{2F} = 1.23 \text{ V} \quad (1-3)$$

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

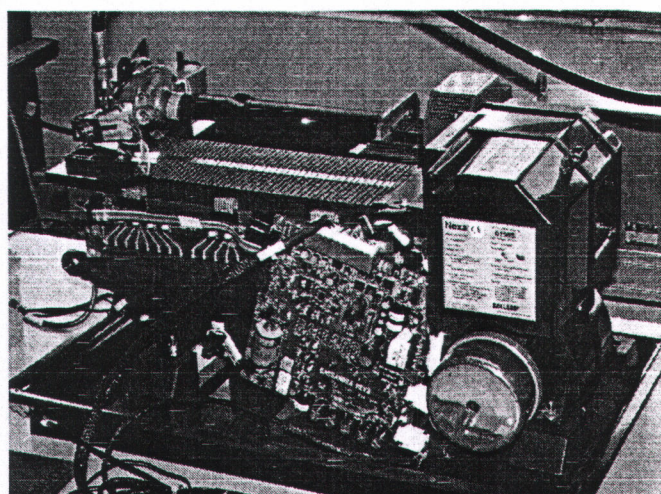


ภาพที่ 1-4 การต่อเซลล์แบบอนุกรมของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มแรงดัน

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 และ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด 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 เซลล์เชื้อเพลิงนี้ปัจจุบันถูกนำไปใช้ในงานวิจัยที่ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ดังแสดงในภาพที่ 1-6



ภาพที่ 1-5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 23 เซลล์ต่ออนุกรม

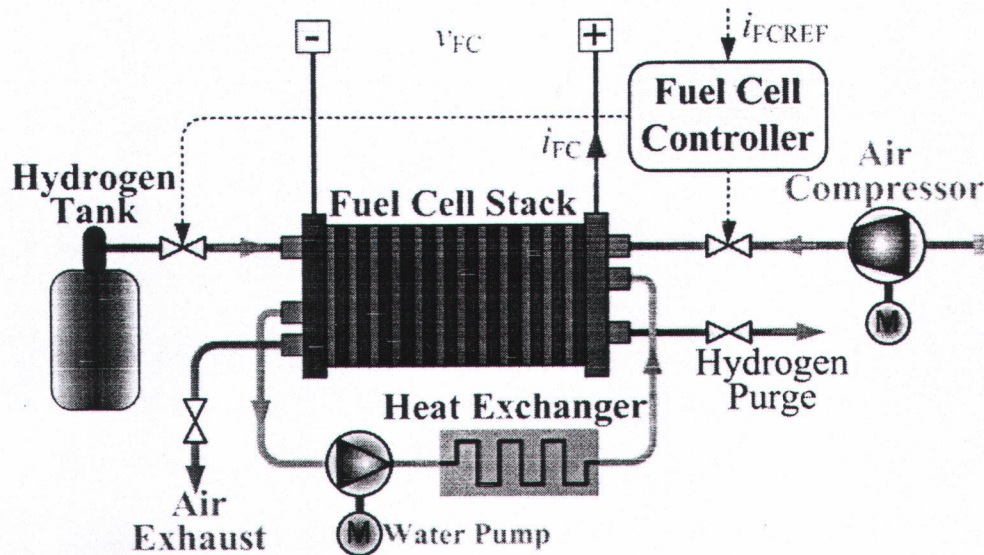


ภาพที่ 1-6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่มี 47 เซลล์ต่ออนุกรม

1.1.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีความจำเป็นในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [4], [5] เช่น การป้อนก๊าซและการระบายความร้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นระบบเซลล์เชื้อเพลิงจึงประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ภาพที่ 1-7 แสดงระบบอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ประกอบด้วยถังไฮโดรเจน ตัวควบคุม

ความชื้นวาล์ว ตัวระบายและแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่ง V_{FC} คือแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง i_{FC} คือกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง i_{FCREF} คือกระแสอ้างอิงของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อควบคุมการจ่ายไฮโดรเจนและอากาศ

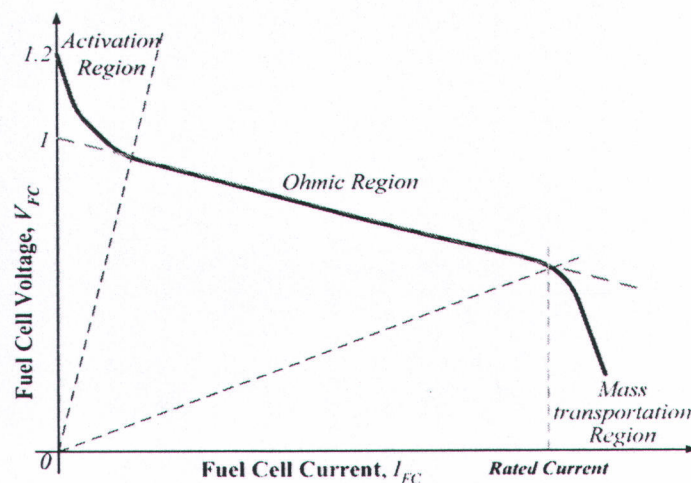


ภาพที่ 1-7 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

ภาพที่ 1-8 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า [6] กราฟที่ได้ประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ

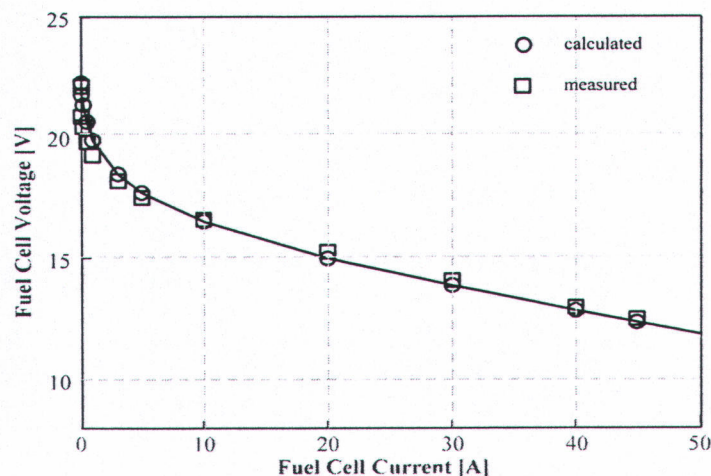
- ปรากฏการณ์กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเชิงเส้นที่แรงดันตก มีสาเหตุจากความต้านทานภายใน
- ส่วนสุดท้ายคือพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด กลายเป็นปัจจัย

จำกัดทำให้แรงดันตกอย่างมาก



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

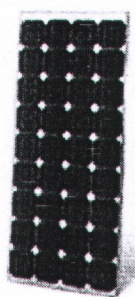
1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (หรือโซลาร์เซลล์)

1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

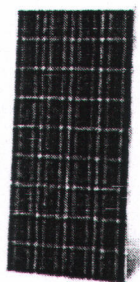
เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่นซิลิคอน (Silicon) แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้าและจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้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

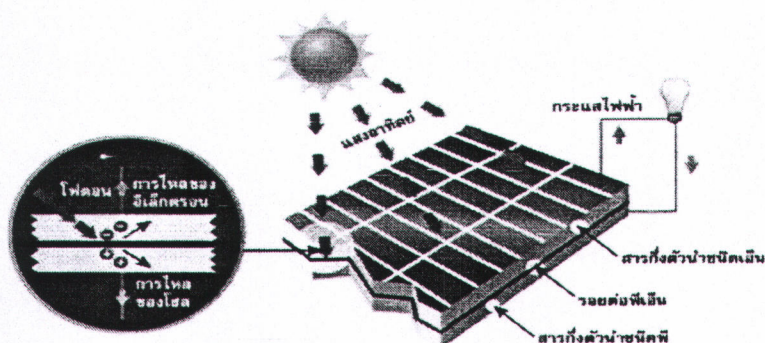
- Polycrystalline Silicon Solar Cell เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มิลลิเมตร) น้ำหนักเบาและประสิทธิภาพเพียง 5-10 เปอร์เซ็นต์

- Amorphous Silicon Solar Cell เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก สารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนต์ แคดเมียม เทลเลไนด์ และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนต์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาร์เซไนต์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25 เปอร์เซ็นต์

1.2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

มีลักษณะโครงสร้างแบบรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอนจึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถูและผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัสจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ เมื่อเติมสารเจือโบรอนจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลม หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มิลลิเมตร) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มี การนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้ารับแสงจะมีลักษณะคล้ายกังปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

1.2.4 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์



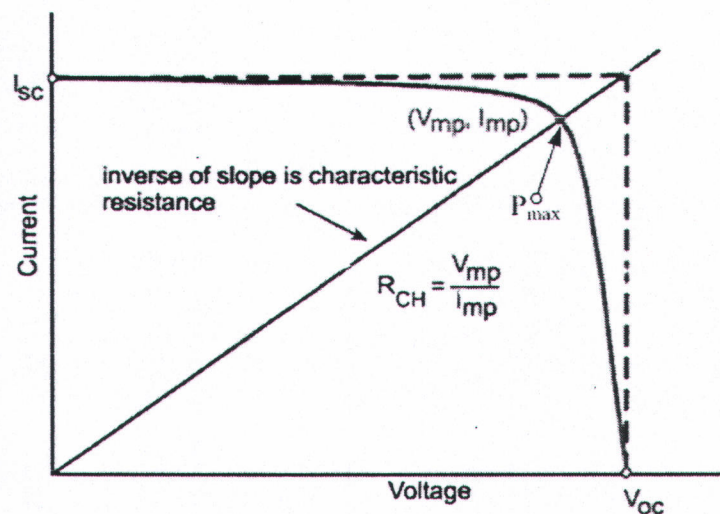
ภาพที่ 1-11 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและประจุบวกขึ้น ได้แก่อิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างรอยต่อของสารพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าขึ้น

ภายในเซลล์เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ 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}

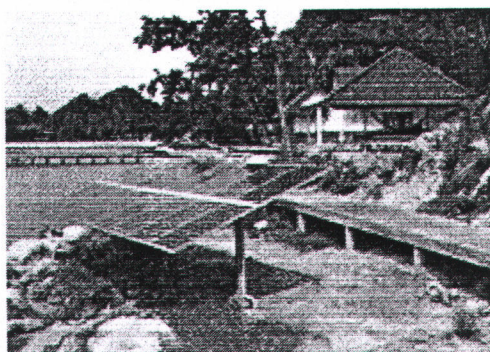


ภาพที่ 1-12 กราฟลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.6 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ มี 4 ระบบใช้งานดังนี้ [7]

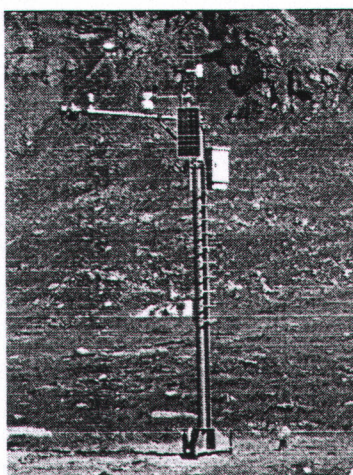
1.2.6.1 ระบบจ่ายไฟสำหรับที่พักอาศัยที่เป็นอิสระ (Off-grid domestic) ระบบนี้จ่ายไฟสำหรับให้บ้านเรือนและหมู่บ้าน ระบบไฟฟ้านี้ไม่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า โดยเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าสำหรับแสงสว่าง ตู้เย็นและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่กำลังต่ำๆ และจากข้อมูลหลายๆ ประเทศที่มีระบบจ่ายไฟแบบนี้ จะมีกำลังไฟฟ้าอยู่ประมาณ 1000 W และเป็นทางเลือกทางหนึ่งในการประหยัดและช่วยระบบจ่ายไฟหลักสำหรับบ้านหรือหมู่บ้านที่อยู่ห่างจากระบบจ่ายไฟหลักมากกว่า 1 ถึง 2 กิโลเมตร

ในภาพที่ 1-13 แสดงตัวอย่างการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับที่พักอาศัยที่เกาะง่าม หมู่เกาะช้าง จังหวัดตราด โดยไม่ต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้าขนาด 2.5 kW โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเอกรัฐโซล่า



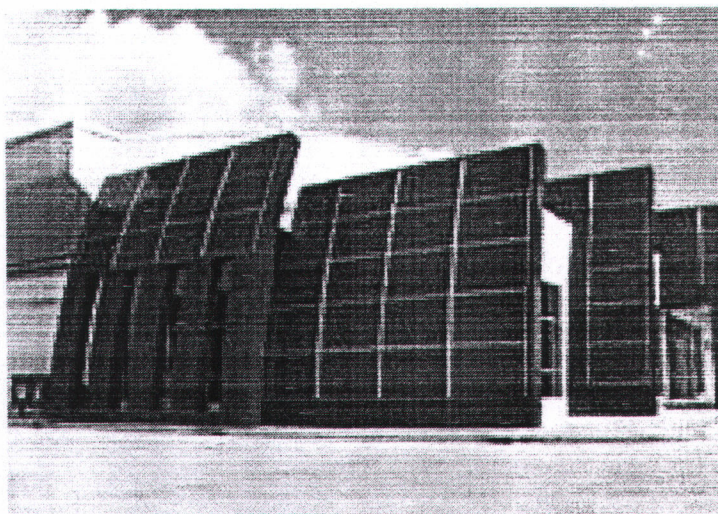
ภาพที่ 1-13 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับที่พักอาศัยที่เกาะง่าม จังหวัดตราด

1.2.6.2 ระบบจ่ายไฟสำหรับไม่ใช่ที่พักอาศัยที่ไม่ต่อเข้าระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้า (Off-grid non-domestic) ระบบจ่ายไฟแบบนี้ถือได้ว่าเป็นงานที่มีการประยุกต์ใช้งานแรกทางด้านการค้าที่ใช้งานบนโลก เพราะเดิมทีนั้นระบบจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีใช้งานมานานแล้วในยานหรือกระสวยอวกาศ มีงานจำนวนมากที่ต้องการระบบจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ เช่น ระบบสื่อสาร บั๊มน้ำ ตู้แช่วัคซีน หรือระบบนาร่อง งานเหล่านี้ไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมากนัก แต่มีความจำเป็นต้องการกำลังไฟฟ้าจ่ายไฟเลี้ยงระบบ ทำให้ราคากระบบจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นี้สามารถแข่งขันกับระบบจ่ายไฟกำลังต่ำด้วยแหล่งจ่ายอื่นได้ ซึ่งภาพที่ 1-14 แสดงระบบไฟเลี้ยงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนาร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์



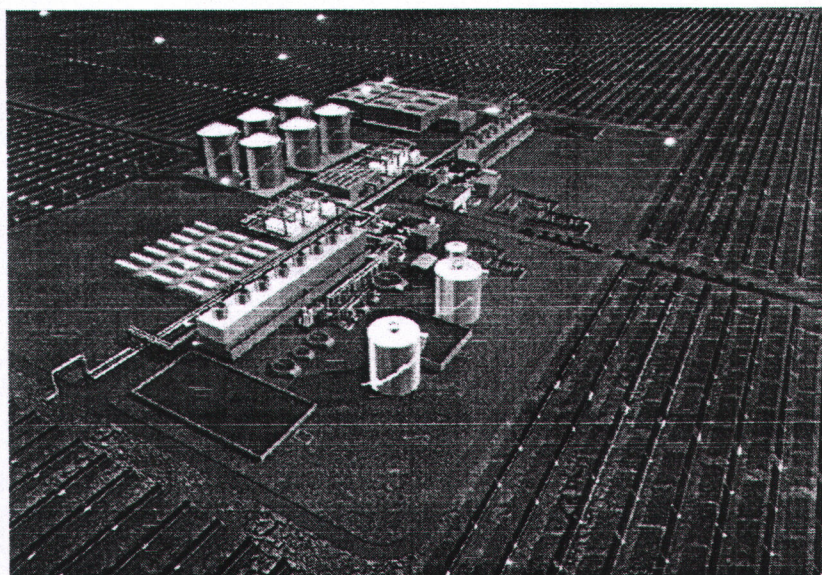
ภาพที่ 1-14 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบนาร่องเครื่องบินในประเทศสวิตเซอร์แลนด์

1.2.6.3 ระบบจ่ายไฟที่ต่อเข้าระบบ (Grid Connected) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ถูกติดตั้งเพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบให้ผู้บริโภคหรือต่อโดยตรงเข้ากับระบบไฟของการไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ของระบบไฟฟ้าที่มีวงพื้นที่จำกัดผู้บริโภคแทนที่จะเป็นระบบจ่ายไฟขนาดใหญ่ ขนาดของระบบนี้ไม่เป็นที่แน่นอน อาจจะมีขนาดถึง 1 MW ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านพักอาศัย ซึ่งในภาพที่ 1-15 แสดงระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected) ที่โรงงานของ บริษัทเอกรัฐโซล่า ที่จังหวัดระยอง มีขนาด 8.28 kW โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเอกรัฐโซล่า



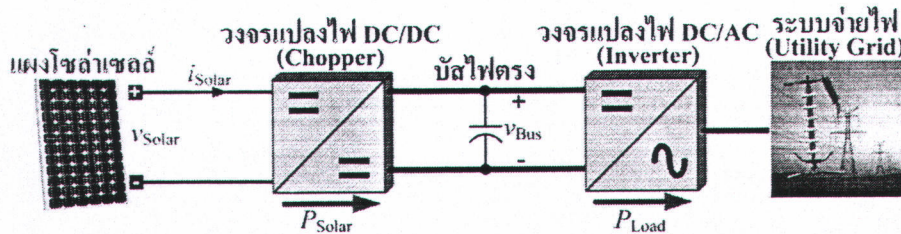
ภาพที่ 1-15 ระบบโซลาร์เซลล์ที่ต่อไฟเข้ากับระบบ (Grid Connected)

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

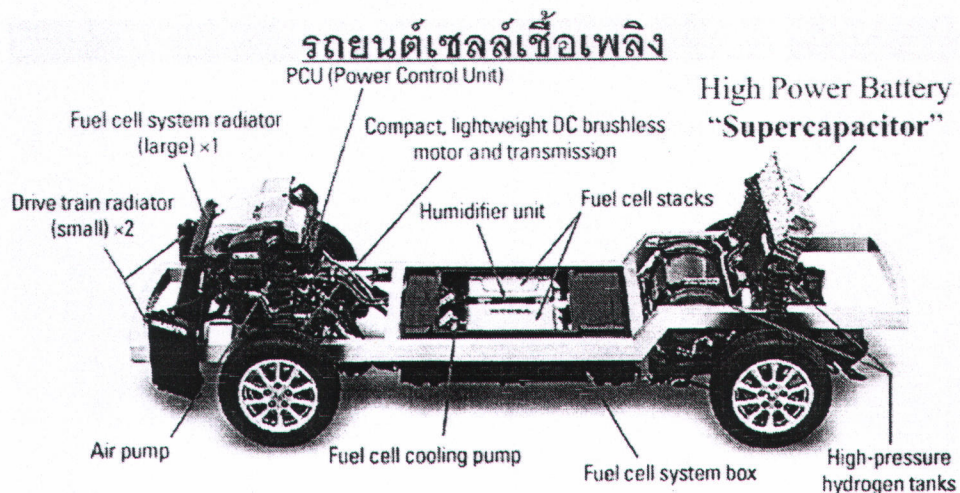


ภาพที่ 1-17 ระบบส่งจ่ายไฟด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

1.3 แบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์

ตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 90 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่สำหรับนำไปใช้กับงานกำลังไฟฟ้าที่สูงได้เริ่มถูกผลิตขึ้น [8] หน่วยความจุของคาปาซิเตอร์จะมีหน่วย ฟาราดส์ (Farads) ปัจจุบันความจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าสูงมากถึงเป็น “พันฟาราดส์” โดยมีระดับความจุของพลังงานที่ประมาณ $5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ซึ่งมีความจุเป็นล้านเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ (เป็นคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์) แต่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์หนึ่งเซลล์จะทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้น้อยไม่เกิน 3 V นอกจากนี้กระบวนการทางไฟฟ้าสถิตของอุปกรณ์ชนิดนี้ คือพยายามลดค่าความต้านทานภายในให้น้อยที่สุด 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



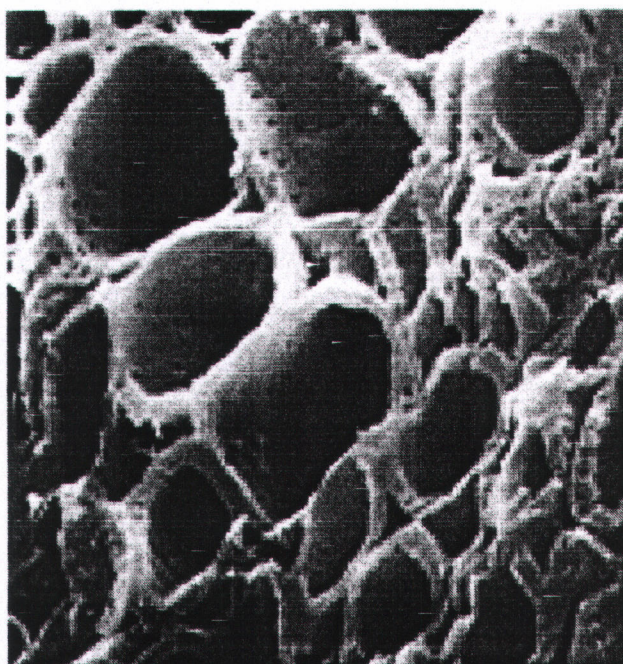
ภาพที่ 1-18 แนวคิดรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต

1.3.1 หลักการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์

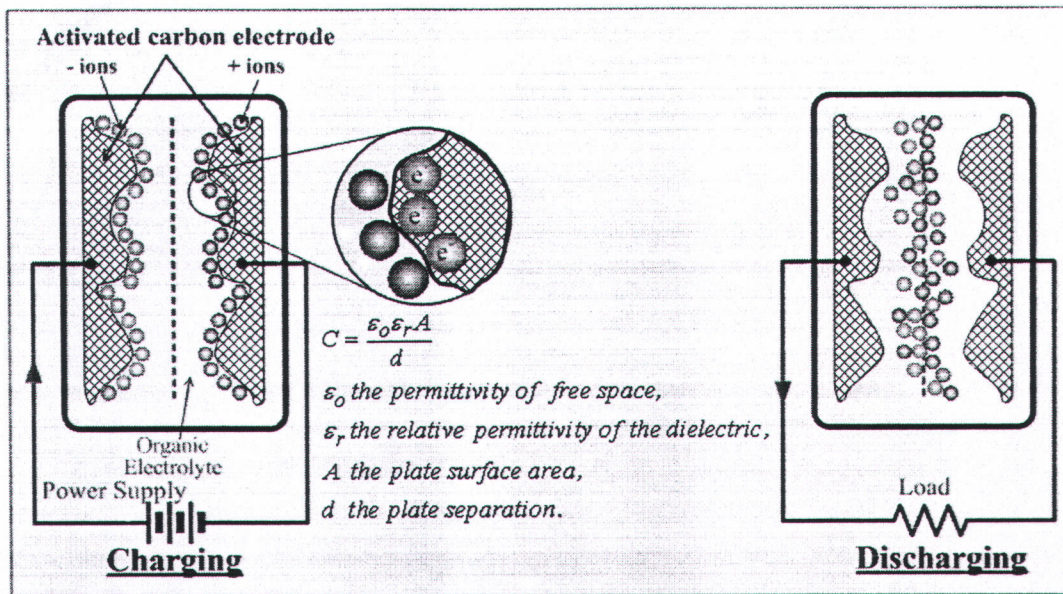
เป็นหลักการพื้นฐานของคาปาซิเตอร์แบบประจุไฟฟ้า 2 ชั้น (Electric Double-Layer) จากคุณสมบัติประจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าชนิดแข็งกับตัวนำประจุไฟฟ้าของเหลว คุณสมบัตินี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1853 โดย Helmholtz (นักวิทยาศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่และผู้คิดสูตรทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ ในศตวรรษที่ 19) การเก็บพลังงานได้จากพื้นที่ถ่ายเทประจุระหว่างของแข็งกับของเหลวภายใต้ไฟฟ้าสถิตจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้พื้นที่ถ่ายเทประจุนี้เรียกว่าประจุไฟฟ้า 2 ชั้น มีความหนาจำกัดในระดับนาโนเมตร ตามหลักฟิสิกส์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ก็คือตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) ที่รู้จักกันทั่วไป การเก็บสะสมพลังงานใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต ไม่ใช่แบบไฟฟ้าเคมีที่ใช้กับแบตเตอรี่จึงทำให้ศักยภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์สูงขึ้น วัสดุไดอิเล็กทริกส์ประกอบด้วยโมเลกุลความเข้มข้นสูง 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 จึงมีการใช้วัสดุอิเล็กโทรดแบบมีโพรงที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก เทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดโดยการใช้แอคทีฟคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 1-19 ที่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีมากกว่า $1000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ จนถึง $3000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ และทำให้ได้ความจุสูงหลายร้อยฟาราดส์ต่อหนึ่งเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 1-20 และ 1-21 ประกอบด้วย

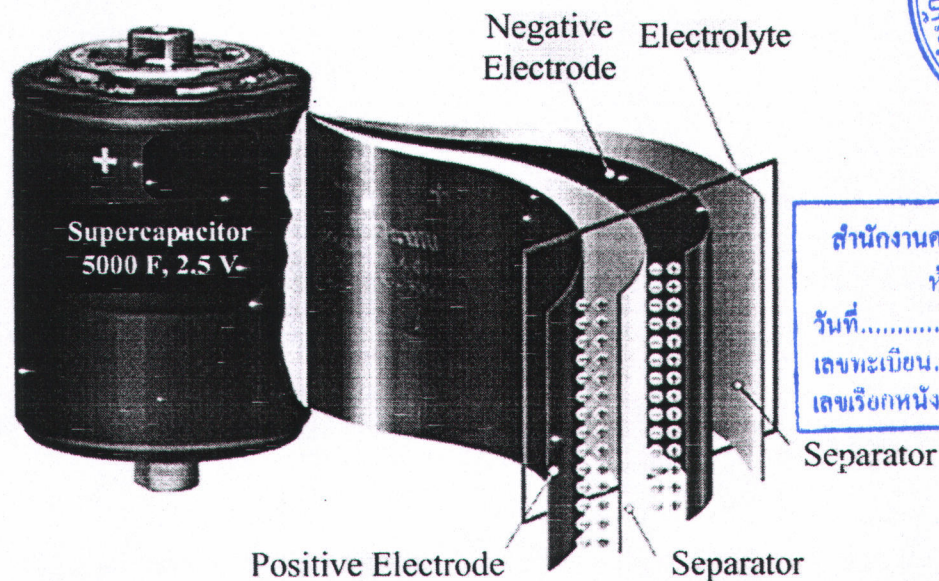
- อิเล็กโทรด 2 ตัวชนิดคาร์บอนเป็นโพรงแช่ในอิเล็กโทรไลต์
- เมมเบรนที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแต่เป็นตัวนำประจุระหว่างอิเล็กโทรด ป้องกันการลัดวงจร
- ขั้วต่อที่เป็นโลหะ โดยปกติเป็นอะลูมิเนียม



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 ชั้นที่ถูกพัฒนาจากการประสานระหว่างอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนแบบมีพรอง และอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว (กรดซัลฟูริก) ในปี ค.ศ. 1969 สิทธิบัตรอีกชิ้นจากบริษัท SOHIO ได้ทำการจดทะเบียนซึ่งได้อธิบายซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ทนแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า โดยใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เป็นของเหลว

เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้ถูกใช้งานอย่างประสบความสำเร็จที่เมืองโคโลญน์ประเทศเยอรมันนีและล่าสุดได้มีการนำซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไปใช้ในงานรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่สำหรับระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรม ลิฟต์ และรถไฟฟ้า

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

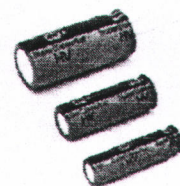
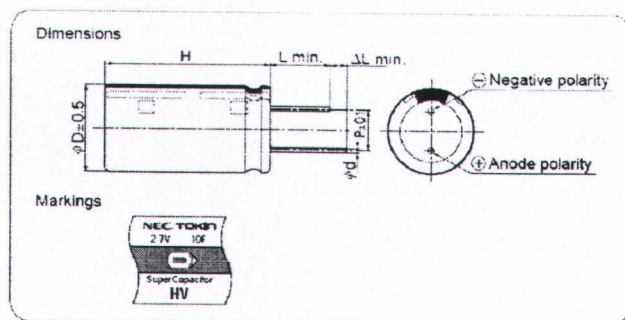
$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C(t) \cdot dt + v_C(t_0) \quad (1-4)$$

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

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

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

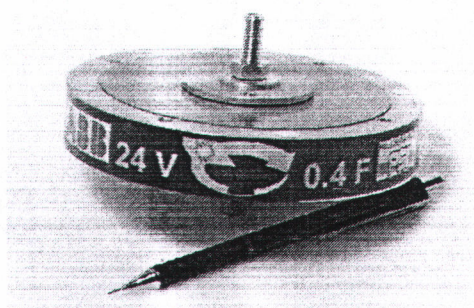
ขณะที่งานการคายของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้เริ่มต้นเพียงไม่กี่ปี อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนและอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นแบบของเหลวและอแกนิกส่วนใหญ่ผลิตโดยบริษัท NEC และ Matsushita ซึ่งมีขนาดเล็ก (ค่าความจุต่ำประมาณ $0.5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) สำหรับใช้ในงานด้านสัญญาณ เช่น หน่วยความจำสำรอง 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

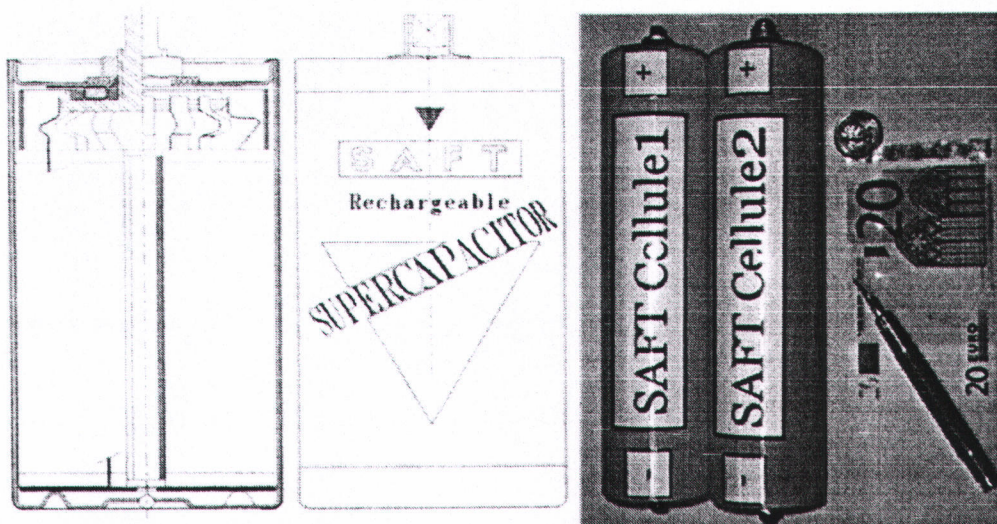
Part No.	Max. Rated Voltage (Vdc)	Nominal Capacitance (F)	Max. ESR (at 1 kHz) (mΩ)	Max. Current at 30 minutes (mA)	Dimensions (Unit: mm)						Weight (g)
					ΦD	H	P	Φd	l	ΔL	
HV0E106N	2.7	10	500	8	10.0	35±2	5.0	0.6	15.0	5.0	4.5
HV0E226N	2.7	22	500	18	12.5	35±2	5.0	0.6	15.0	5.0	6.5
HV0E506N	2.7	50	100	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 1-22 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กของบริษัท NEC

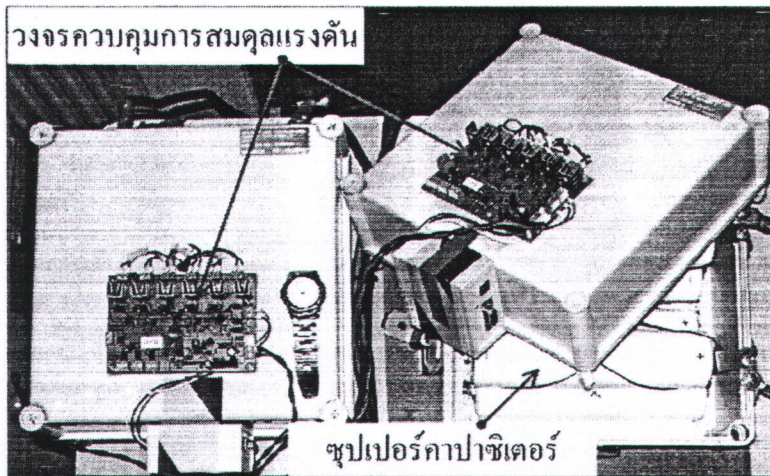


ภาพที่ 1-23 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็ก (24 V, 0.4 F, 5.7 kW)

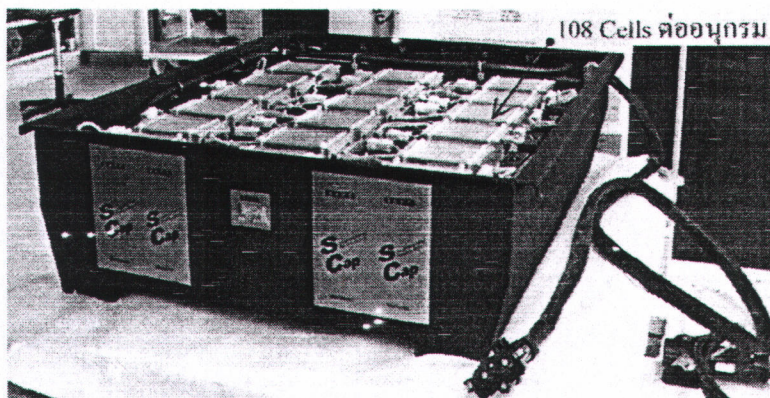
ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง (มีค่าความจุเป็น kF มีระดับความหนาแน่นพลังงาน ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) และกำลังไฟฟ้า $\text{kW}\cdot\text{kg}^{-1}$ ที่สูงมาก) ซึ่งสามารถหาซื้อได้ในปัจจุบัน ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์หนึ่งเซลล์จะมีแรงดันต่ำมาก ดังนั้นเมื่อนำไปต่อใช้งานจะนำมาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันและถ้าต้องการเพิ่มความจุก็จะนำมาต่อขนานกันได้อีกเป็นวิธีการเดียวกับแบตเตอรี่ 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



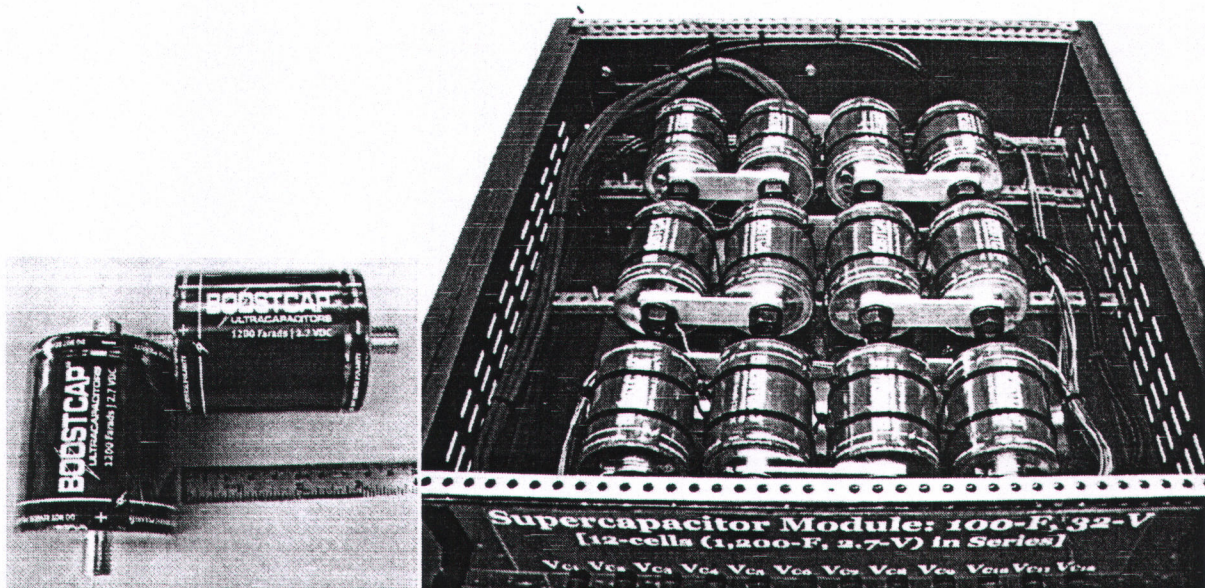
ภาพที่ 1-24 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ต้นแบบของบริษัท SAFT



ภาพที่ 1-25 ชุดเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดเล็ก 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน



ภาพที่ 1-26 ชุดเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน



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



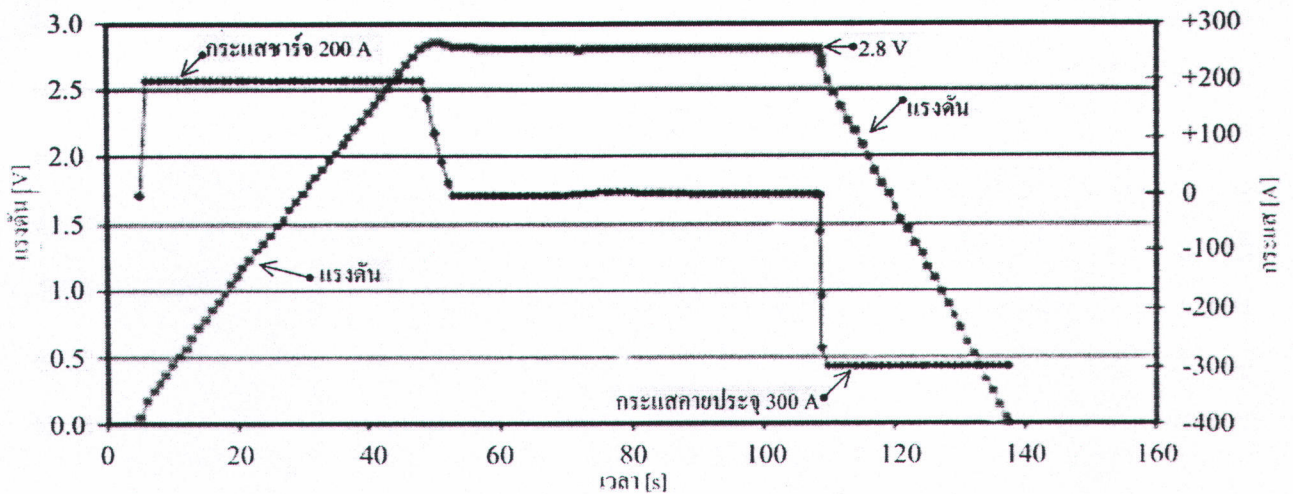
ภาพที่ 1-28 ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 1-1 ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน

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

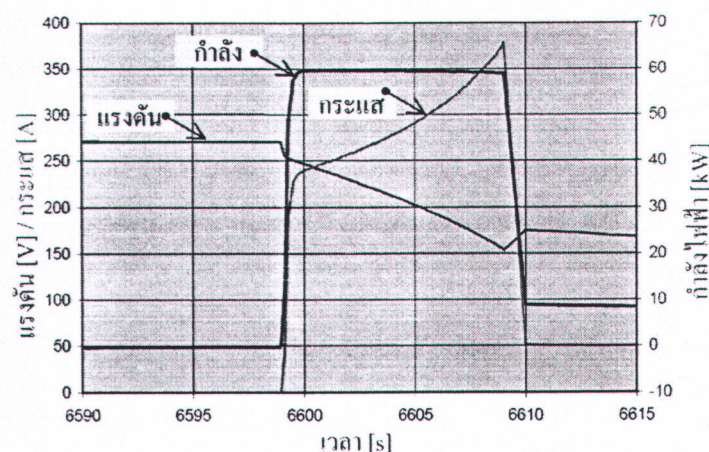
1.3.3 ลักษณะสมบัติของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

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



ภาพที่ 1-29 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 เซลล์

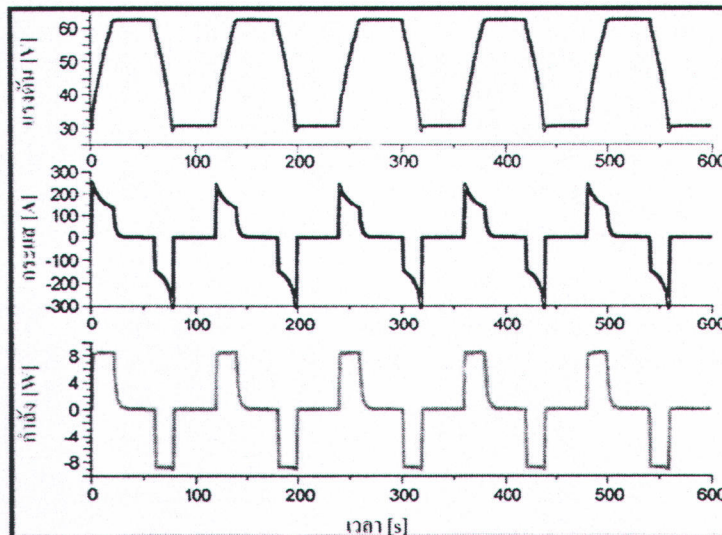
ขณะที่ภาพที่ 1-30 แสดงสัญญาณแรงดัน กระแสและกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ขณะทำการทดสอบซูเปอร์คาปาซิเตอร์ของบริษัท SAFT โมดูลขนาดใหญ่ 108 ตัว ต่ออนุกรมกัน (32.4 F, 270 V) ขณะจ่ายไฟที่กำลังไฟฟ้าคงที่ 60 kW ก่อนจ่ายไฟแรงดันซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลถูกชาร์จเต็มที่ 270 V หมายความว่ามีความเก็บสะสมในซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลอยู่ 1.2 MJ ที่เวลา 6598 วินาที ซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลถูกบังคับให้จ่ายกำลังไฟฟ้าที่คงที่ 60 kW เราจะสังเกตได้ว่าแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูลลดลงเพราะมีการจ่ายพลังงานออกไปนั่นเอง 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 จากการทดสอบทั้งหมดจะเห็นได้ว่าซูเปอร์

คาปาซิเตอร์สามารถชาร์จและจ่ายไฟที่กำลังไฟสูงและรวดเร็ว ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่แบตเตอรี่ไม่สามารถทำงานได้ ทำให้เป็นจุดเด่นที่สำคัญของซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั่นเอง ภาพที่ 1-31 แสดงลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A 2600 F, 2.5 V ต่ออนุกรมกัน 25 ตัว ของบริษัท Maxwell

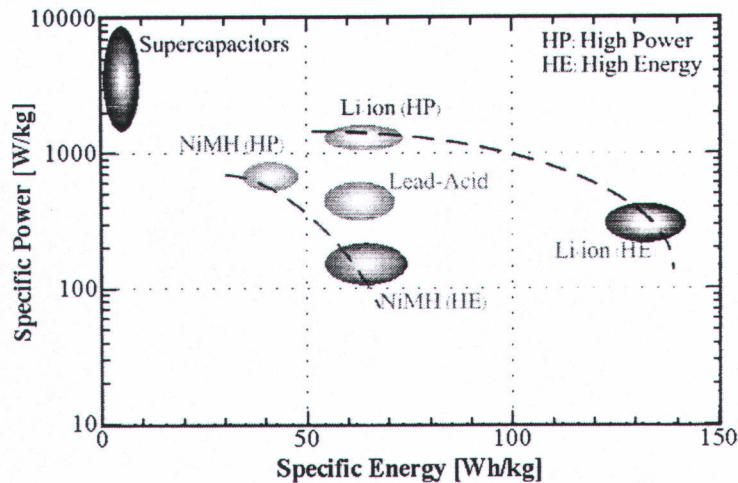


ภาพที่ 1-31 ลักษณะสมบัติของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โมดูล รุ่น BCAP010A ของบริษัท Maxwell

1.3.4 เปรียบเทียบแบตเตอรี่กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์

เนื่องจากแบตเตอรี่ทั่วไปมีค่าความต้านทานภายในที่สูงกว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพในการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่า เพราะค่าความต้านทานภายในทำให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนนั่นเอง ดังนั้นในงานกำลังไฟสูงๆ ถ้าระบบสำรองไฟเป็นแบตเตอรี่ จำเป็นต้องติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วย ทำให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้น เราสามารถสรุปประสิทธิภาพรอบการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าสูงกว่าอยู่ที่ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ [9], [10]

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 ($\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) ที่สูงกว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์อยู่มากก็ตาม แต่ต้องไม่ลืมว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถจ่ายไฟได้เร็วมากเพราะมีค่าความต้านทานภายในที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ ขณะที่อายุการใช้งานของแบตเตอรี่แบบตะกั่วอยู่ที่ 1000 รอบ (Charge/Discharge Cycle) แต่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะมีอายุการใช้งานที่นานมาก เราอาจจะประมาณได้ว่ามีอายุเป็นอนันต์ [11]

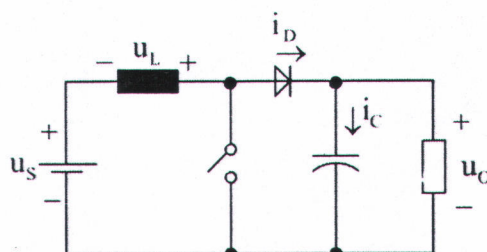


ภาพที่ 1-32 เปรียบเทียบพลังงานต่อน้ำหนัก ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) กับกำลังงานต่อน้ำหนัก ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$) ของเทคโนโลยีซูเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-Acid) แบบลิเทียมไอออนและแบบนิเกิลเมทัลไฮไดรด์

1.4 วงจรแปลงไฟแบบทิศทางเดียวสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันแรงดันดังภาพที่ 1-33 ที่จะนำมาต่อใช้งานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อที่จะนำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้งาน จึงเลือกวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ [12] ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าโดยอาศัยการเก็บและคายพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำและมีจำนวนอุปกรณ์น้อย ออกแบบง่าย ในการพิจารณาหลักการทำงานของวงจร มีเงื่อนไขการทำงานคือ

- กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์
- ตัวเก็บประจุทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
- กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

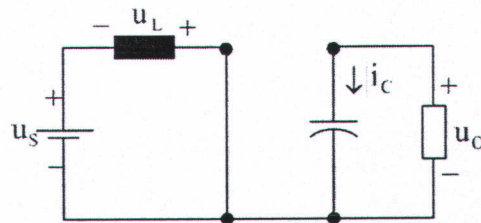


ภาพที่ 1-33 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

1.4.1 หลักการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ [13], [14]

เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะคงตัวดังนี้

1.4.1.1 ขณะสวิตช์นำกระแส



ภาพที่ 1-34 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

พิจารณาจากภาพที่ 1-34 พบว่าแรงดันที่แหล่งจ่าย u_S มีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อม u_L ไดโอดจะถูกไบอัสกลับ จึงสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$-u_S + u_L = 0 \quad (1-6)$$

$$u_L = u_S = L \frac{di_L}{dt}$$

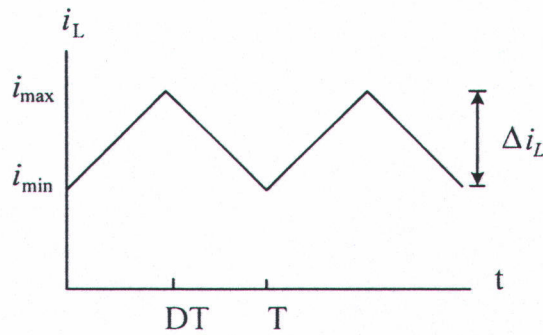
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_S}{L} \quad (1-7)$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{u_S}{L} \quad (1-8)$$

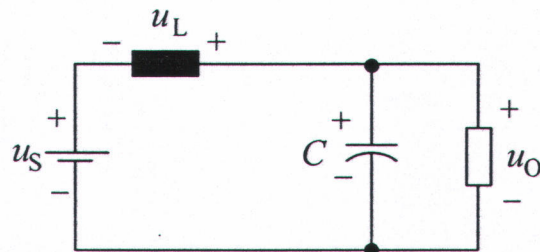
$$\Delta i_{L,on} = \frac{u_S DT}{L} \quad (1-9)$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังภาพที่ 1-35 ที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงาน



ภาพที่ 1-35 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

1.4.1.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



ภาพที่ 1-36 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสดังภาพที่ 1-36 กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-u_S + u_L + u_O = 0 \quad (1-10)$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-11)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_S - u_O}{L} \quad (1-12)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้นดังภาพที่ 1-35 ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{u_S - u_O}{L} \right) (1-D)T \quad (1-13)$$

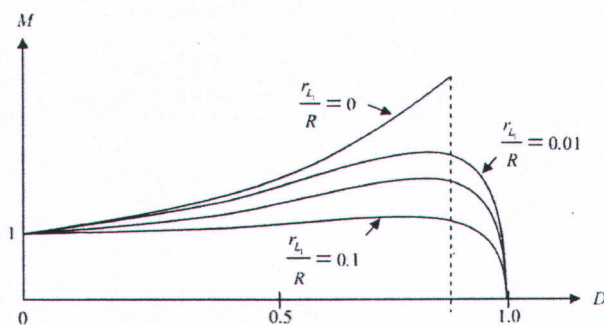
ที่สภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวเหนี่ยวนำสุทธิ มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยจากวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์จะได้ดังสมการที่ (1-14)

$$\frac{u_O}{u_S} = \frac{1}{1-D} \quad (1-14)$$

อัตราการใช้พลังงาน (M) หาได้ดังนี้

$$M = \frac{U_O}{U_S} \quad (1-15)$$

จากภาพที่ 1-37 เมื่อแทนวัฏจักรงาน (D) ให้เข้าสู่ค่า 1 จะทำให้อัตราการใช้พลังงาน (M) จะมีค่าลดลงเป็นศูนย์ แทนที่จะเป็นอนันต์เหมือนในอุดมคติ ดังนั้นค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำมีผลต่ออัตราขยายนี้ กล่าวคือถ้าค่าความต้านทานมีค่าน้อยมาก ($r_L=0.01$) อัตราขยายมีค่ามากกว่า เมื่อมีความต้านทานน้อย ($r_L=0.1$) เนื่องจากเกิดการสูญเสียที่ตัวเหนี่ยวนำมากขึ้น แต่สุดท้ายเมื่อค่าวัฏจักรงาน (D) มีค่าเป็น 1 อัตราขยายจะมีค่าเป็นศูนย์



ภาพที่ 1-37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการใช้พลังงานและวัฏจักรงาน เมื่อ r_L/R มีการเปลี่ยนแปลง R คือค่าความต้านทานที่ต่อเป็นโหลดทางไฟฟ้า r_L คือค่าความต้านทานภายในขดลวดเหนี่ยวนำ

การได้มาซึ่งอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตเมื่อเพิ่มค่า D เป็นการเพิ่มอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการเพิ่มอัตราขยายนี้จะเพิ่มแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 5 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีความเสถียรภาพ

1.4.1.3 แรงดันกระเพื่อมด้านเอาต์พุต (Output Voltage Ripple) การทำงานของวงจรบัสต์นั้นจะต้องได้แรงดันเอาต์พุตที่สูงกว่าแรงดันอินพุต ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นแสดงว่าตัวเหนี่ยวนำไม่คายพลังงานเสริมแรงดันอินพุต เมื่อสวิตช์ปิดวงจร (Turn On) แรงดันเอาต์พุตจะได้จากการคายประจุของตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว เพราะฉะนั้นขนาดของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันเอาต์พุตและโหมดการทำงาน

ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะให้ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เพื่อที่จะทำให้ขนาดของแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตมีขนาดลดลง ตัวเก็บประจุจะคายพลังงานให้อาต์พุตในช่วงเวลาที่สวิตช์ปิดวงจร (Turn On) และหาค่าเก็บประจุได้จากค่ากระแสเอาต์พุตในช่วงเวลาดังกล่าว

$$\Delta U_c = \frac{1}{C} \int_{t_{off}}^{t_{on}} i_o dt = \frac{i_{Oon}}{C} \quad (1-16)$$

หากพิจารณาจากช่วงเวลา t_{on} ในคอนเวอร์เตอร์จะมีความถี่ในการสวิตช์เมื่อพิจารณาให้อยู่ในเทอมของเอาต์พุตซึ่งจะได้จากสมการที่ (1-17) และพิจารณาความถี่ด้วยจะได้

$$U_o = \frac{u_s}{1-D} = \frac{u_s}{T-t_{on}} \quad (1-17)$$

$$\Delta U_C = \frac{(i_O(u_O - u_S + Du_S)/(1-D))}{fCu_S/(1-D)} = \frac{i_OD}{fC} \quad (1-18)$$

ดังนั้นตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตของวงจรทบทแรงดันจะหาได้จาก

$$\Delta u_C = \Delta u_O \quad (1-19)$$

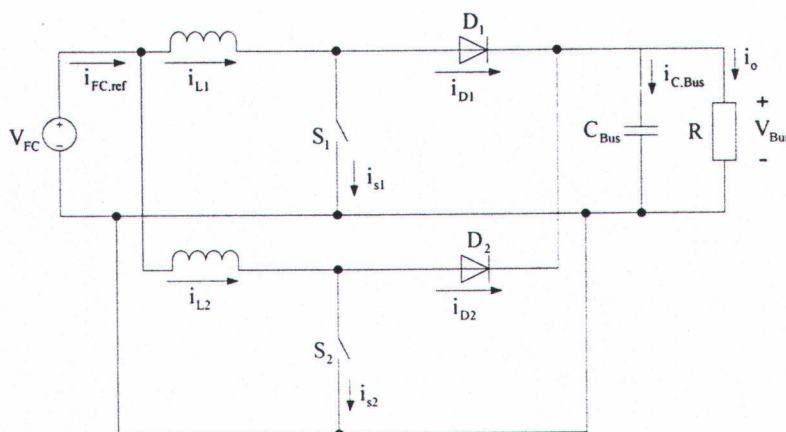
จะได้

$$C = \frac{i_OD}{f\Delta u_O} \quad (1-20)$$

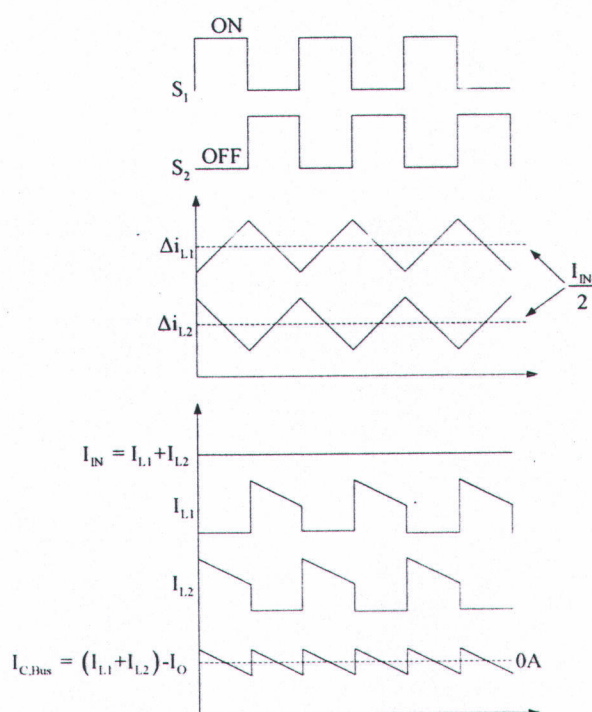
1.4.2 เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ (Interleaved Technique)

เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ (Interleaved Technique) สามารถทำได้โดยการนำเอาสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรแปลงผันหลายๆ วงจรมาต่อขนานกัน แล้วกำหนดสัญญาณขับนำสวิตช์ให้เหลื่อมเวลาการทำงานกันออกไปเพื่อให้วงจรสลับการทำงานซึ่งกันและกันโดยจะแบ่งมุมการทำงานของสัญญาณขับนำสวิตช์ให้ทำงานให้ครบกันพอดีในแต่ละหนึ่งรอบเวลาการทำงาน $(360/N)$ [15], [16] ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนวงจร (N) ที่นำมาอินเตอร์ลีฟกันและมีความถี่ของการสวิตช์เท่ากันและหลักการนี้จะทำให้แอมพลิจูดของกระแสกระเพื่อมลดลงและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของความถี่กระแส โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียที่สวิตช์หรืออุปกรณ์ การนำวงจรแปลงผันแบบบูสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกันโดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้นและลดค่าการกระเพื่อมของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำทำให้สามารถลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำลงได้

ในการวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ได้นำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกัน 2 วงจร ดังในภาพที่ 1-38 โดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสอินพุตสูงโดยจัดให้มีเฟสของสัญญาณขับนำสวิตช์ตัวบนและตัวล่างห่างกัน 180 องศา ซึ่งกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวกลับเฟสกัน 180 องศา และกระแสเอาต์พุตจะมีขนาดการกระเพื่อมลดลงครึ่งหนึ่ง ดังในภาพที่ 1-39

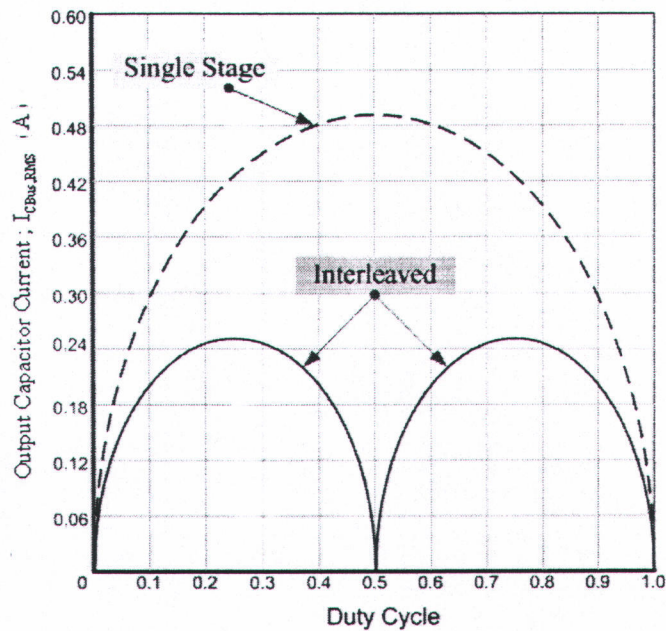


ภาพที่ 1-38 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกัน 2 วงจร



ภาพที่ 1-39 สัญญาณการสวิตช์ที่ต่างเฟสกัน 180 องศา กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

จากคุณสมบัติของการอินเตอร์ลีฟที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สามารถนำค่าการกระเพื่อมของแต่ละวงจรมาหักล้างกันได้ (Ripple Cancellation) นั่นคือค่าการกระเพื่อมที่ด้านออกลดลงและขนาดค่าการกระเพื่อมจากการหักล้างกันของสองวงจรมีความสัมพันธ์กับวัฏจักรงานดังในภาพที่ 1-40 พบว่าค่าการกระเพื่อมถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์เมื่อวัฏจักรงานเป็น 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 1-40 กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($I_{CBus,RMS}$) กับวัฏจักรงานของวงจรแปลงผันที่มีการขนาน 2 วงจร

ดังนั้นการนำวงจรทบทแรงดันมาต่อขนานกันหลายๆ ตัว เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นการนำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มาต่อขนานกันจนถึง N ตัว วิธีการนี้เรียกว่า Interleaved Technique วิธีการนี้เป็นการเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสทางด้านเอาต์พุตให้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม และมีข้อดีคือสามารถลดกระแสกระเพื่อมทางด้านอินพุตได้อีกด้วย มีชื่อเรียกว่าอินเตอร์ลีฟ (Interleaved Techniques) วิธีการขนานวงจรทบทแรงดันจะมีการแยกการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัวให้มีมุมต่างเฟสเพื่อที่สวิตช์จะไม่ทำงานพร้อมกันสามารถคำนวณได้จากสูตร

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

เมื่อ N คือจำนวนของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่นำมาต่อขนานกัน

จากสูตรการหามุมในการสวิตช์จะเห็นว่าเมื่อมีจำนวนวงจรต่อขนานมากขึ้นทำให้มุมจุดเริ่มต้นในการสวิตช์ก็น้อยลง เมื่อมีสวิตช์ที่นำกระแสมากขึ้นการกระเพื่อมของกระแสก็จะน้อยลงและกระแสก็จะไหลผ่านสวิตช์ทุกตัวที่ต่ออยู่ในวงจร ดังนั้นกระแสรวมทางด้านเอาต์พุตก็จะมากกว่าวงจรทบทแรงดันปกติทั่วไปและกระแสกระเพื่อมยังน้อยลงด้วยนอกจากนี้วงจรทบทแรงดันแบบหลายเฟสนี้ยังมีข้อดี [4], [17], [18] คือ

- ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมีขนาดและจำนวนน้อยลง
- กระแสกระเพื่อม (Ripple Current) ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตน้อยลง

- ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานวงจรทบแรงดันนี้เป็นการเพิ่มความเชื่อมั่น ของระบบ (reliability) ให้เพิ่มมากขึ้นและยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการจ่ายพลังงาน ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ให้มากขึ้นโดยที่ไม่มีการขนานตัวอุปกรณ์เข้าไปในวงจร
- เมื่ออุปกรณ์ของแต่ละวงจรที่นำมาต่อขนานกันช่วยในการจ่ายกระแส ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน อุปกรณ์แต่ละวงจรก็น้อยลง ความร้อนที่เกิดขึ้นก็น้อยลงตามไปด้วย ทำให้ระบบการระบายความร้อน ทำได้ง่ายเพราะความร้อนไม่สูงมาก
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละของวงจรจะช่วยในการจ่ายกระแสรวม ทำให้สามารถลด คุณสมบัติการทนกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวลงได้ทำให้ขนาดของอุปกรณ์เล็กลงได้ และราคาก็ถูกลงด้วย

1.5 วงจรแปลงไฟแบบสองทิศทางสำหรับแบตเตอรี่ [19]

วงจรแปลงไฟแบบสองทิศทางสำหรับแบตเตอรี่นั้นสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะการเก็บประจุ (หรือการชาร์จแบตเตอรี่) และสภาวะการคายประจุ (หรือการใช้งานพลังงานที่เก็บไว้) ซึ่งสถานะการทำงานของวงจรมี 2 สภาวะดังนี้

1.5.1 คอนเวอร์เตอร์แบบทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Boost Converter)

การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะเหมือนกับการทำงานของ วงจรแปลงไฟแบบทิศทางเดียวสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แสงอาทิตย์ ในหัวข้อ 1.4

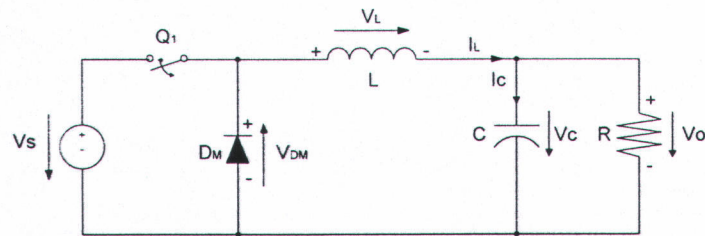
1.5.2 วงจรทอนระดับแรงดันหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

วงจรทอนระดับหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์คือวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าต่ำกว่า แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

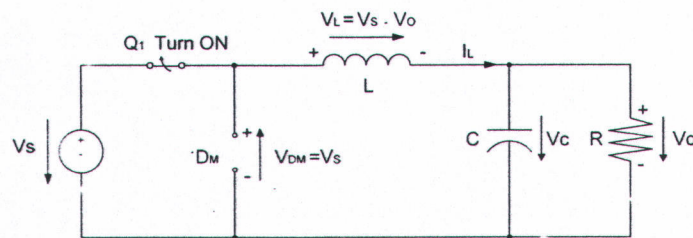
1.5.2.1 การวิเคราะห์ห้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัว (steady state) มีการกำหนดเงื่อนไข การทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ดังนี้

- กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากันหมายถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหล ผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบเวลา
- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงผลรวม ของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่า เท่ากับศูนย์
- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงประจุที่ถูกเก็บ และที่คายของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะต้องเท่ากัน
- กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านออก ในกรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นในทาง อุดมคติ จึงทำให้ไม่มีการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึง เท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

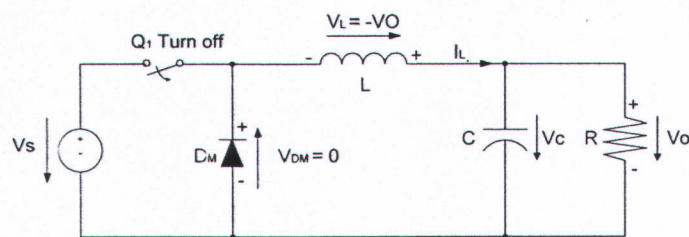
1.5.2.2 หลักการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เพื่อที่จะออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการ ต้องเริ่มต้นจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในคาบเวลาที่มีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมดจะต้องวิเคราะห์ในสภาวะอยู่ตัว วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังภาพที่ 1-41 และวงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังภาพที่ 1-42



ภาพที่ 1-41 วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

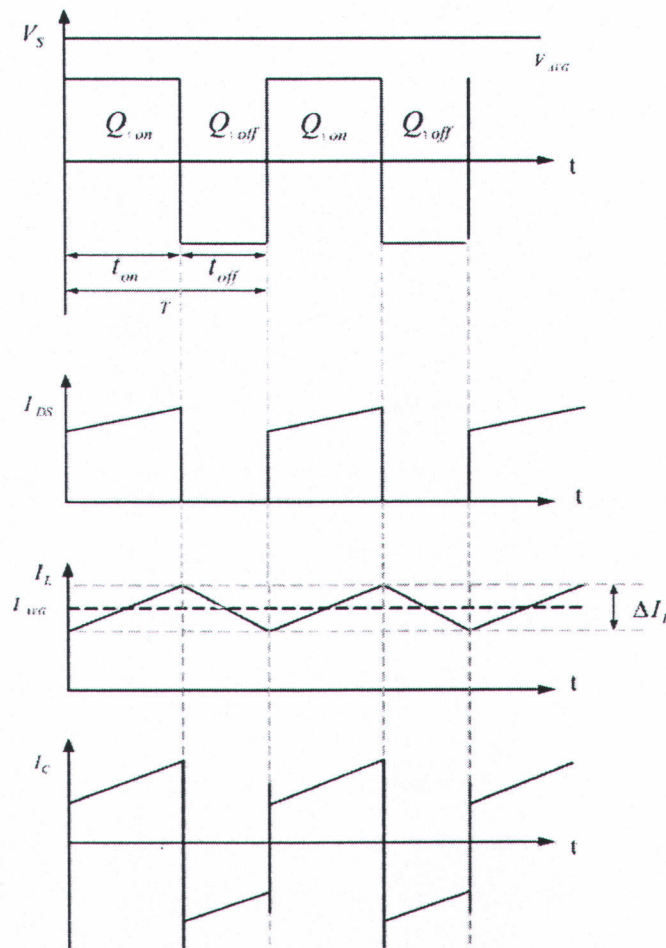


ก. โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด



ข. โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

ภาพที่ 1-42 วงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 1-43 สัญญาณต่างๆ ของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

1.5.2.3 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์ปิด เมื่อ D คือ ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) T คือคาบเวลาการทำงานของดิวตี้ไซเคิล จากภาพที่ 1-42 ก. เป็นการทำงานโหมดที่ 1 จะได้สัญญาณต่างๆ ดังปรากฏในภาพที่ 1-43 ($0 < t \leq t_{on}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์ปิด ($t = 0$) กระแสอินพุตไหลผ่าน Q_1 และตัวเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก I_1 ที่ $t = 0$ เป็นเวลา I_2 ที่ $t = t_1$ โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน R และแรงดันที่แหล่งจ่ายจะเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำบวกกับแรงดันที่ตกคร่อม R ดังสมการที่ (1-21)

$$V_s = V_L + V_o \quad (1-21)$$

เมื่อ

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{d_{il}}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (1-22)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt = DT$

$$\Delta_{il,on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (1-23)$$

1.5.2.4 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด จากภาพที่ 1-42 ข. เป็นการทำงานโหมด 2 จะได้สัญญาณต่างๆ ดังปรากฏในภาพที่ 1-43 ($t_1 < t \leq t_{off}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์เปิด ($t = t_1$) แรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน R ทำให้เอาต์พุตมีค่ามากขึ้นจนทำให้ D_M ทำงานจึงทำให้ตัวเหนี่ยวนำคายพลังงานออกมาเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายตัวหนึ่ง ทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน ดังสมการที่ (1-24)

$$V_D = V_L + V_o \quad (1-24)$$

แต่ $V_D = 0V$ จะได้ $0 = V_L + V_o$, $V_L = -V_o = L \frac{d_{il}}{dt}$

$$L \frac{d_{il}}{dt} = \frac{\Delta_{il,off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (1-25)$$

dt ในกรณี อยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ $dt = (1-D)T$ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (1-23)

$$\Delta_{il,off} = -\left(\frac{V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (1-26)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$ ลงในสมการที่ (1-26) จะได้

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (1-27)$$

1.6 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีอนุพันธ์แบบแฟลต (Differential Flatness Based Control)

ในปี ค.ศ. 1995 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบแฟลต (Flatness Theory) ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดยศาสตราจารย์ Fliess และผู้ร่วมวิจัย [20], [21] ในงานด้านสมการอนุพันธ์แบบพีชคณิต ระบบไม่เป็นเชิงเส้นจะแบน (Flat) ถ้าในระบบมีเซตของตัวแปรอิสระ (independent variables) เท่ากับจำนวนของตัวแปรอินพุต นั่นคือตัวแปรสแตต x และตัวแปรอินพุต (หรือตัวแปรควบคุม) u สามารถแสดงในเทอมของตัวแปรเอาต์พุต y และสามารถแสดงในเทอมการอนุพันธ์ที่จำกัด โดยที่จะไม่ปรากฏสมการอนุพันธ์ในระบบอีกเลย เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้น พิจารณาระบบไดนามิกส์แบบไม่เชิงเส้นในรูปแบบต่างๆ ไปดังนี้

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (1-28)$$

โดยที่

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T; \quad x \in \mathcal{R}^n \quad (1-29)$$

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T; \quad u \in \mathcal{R}^m \quad (1-30)$$

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T; \quad y \in \mathcal{R}^m \quad (1-31)$$

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

ดังแสดงในภาพที่ 1-44 ระบบควบคุมแบบแฟลตที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกเทียบเคียงคล้ายๆ กับระบบควบคุมที่สามารถควบคุมได้ในระบบเชิงเส้น ระบบจะแบนถ้าตัวแปรเอาต์พุต y มีเงื่อนไขดังนี้

- ตัวแปรเอาต์พุต y_i สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรสแตต x_i ตัวแปรอินพุต u_i และอนุพันธ์เทียบกับเวลาที่มีลำดับที่ α

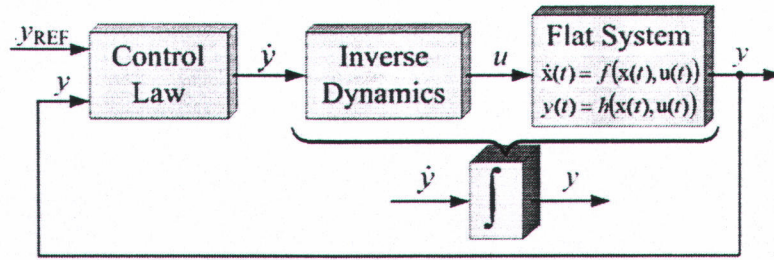
$$y = \phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(\alpha)}) \quad (1-32)$$

- ตัวแปรสแตตทุกตัว x_i และตัวแปรอินพุตทุกตัว u_i สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรเอาต์พุต y_i และอนุพันธ์เทียบกับเวลาที่มีลำดับที่ β

$$x = \varphi(y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta)}) \quad (1-33)$$

$$u = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta+1)}) \quad (1-34)$$

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



ภาพที่ 1-44 แนวคิดระบบควบคุมแบบแฟลต ซึ่ง y คือตัวแปรเอาต์พุต y_{REF} คือตัวแปรเอาต์พุตที่อ้างอิง u คือตัวแปรอินพุตที่ควบคุม

ถ้าตัวแปรเอาต์พุตที่เราสนใจถูกพิสูจน์ได้ว่ามีคุณสมบัติที่เป็นตัวแปรที่แบน y ตัวแปรเอาต์พุตที่เราอ้างอิง y_{REF} ก็จะตรงไปตรงมา ไดนามิกส์ของค่าผิดพลาดสามารถคำนวณได้ โดยที่มีการกำเนิดสัญญาณตัวแปรอินพุตตัวใหม่ v_i เกิดขึ้น (ดังภาพที่ 1-44) คือ

$$0 = (y_i^{(\beta+1)} - y_{i,REF}^{(\beta+1)}) + K_\beta (y_i^\beta - y_{i,REF}^\beta) + \dots + K_0 (y_i - y_{i,REF}) \quad (1-35)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} v_i &= y_{i,REF}^{(\beta+1)} + K_\beta (y_{i,REF}^\beta - y_i^\beta) + \dots + K_0 (y_{i,REF} - y_i) \\ &= y_i^{(\beta+1)} \end{aligned} \quad (1-36)$$

ซึ่ง $K_\beta, \dots, K_0$ คือเซตของตัวแปรของตัวควบคุมและแทนตัวอนุพันธ์ที่สูงที่สุดของ y_i ในเทอมของตัวแปรอินพุตด้วย v_i ตามสมการที่ (1-34) ได้ผลลัพธ์ที่เราเรียกว่าอินเวอร์ไดนามิกส์ (inverse dynamics) [22] คือ

$$u = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^\beta, v) \quad (1-37)$$

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

$$p(s) = s^{\beta+1} + \lambda_\beta s^\beta + \dots + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 \quad (1-38)$$

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

$$e_i^{(\beta+1)} + K_\beta e_i^{(\beta)} + \dots + K_0 e_i = 0 \quad (1-39)$$

ดังนั้น การเลือกค่าที่เหมาะสมของตัวแปรของตัวควบคุมกระทำได้โดยกำหนดตำแหน่งรากตามสมการลักษณะสมบัติ (Characteristic Equation)