

ในการทำการวิจัยเรื่องแหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่ มีขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมด 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

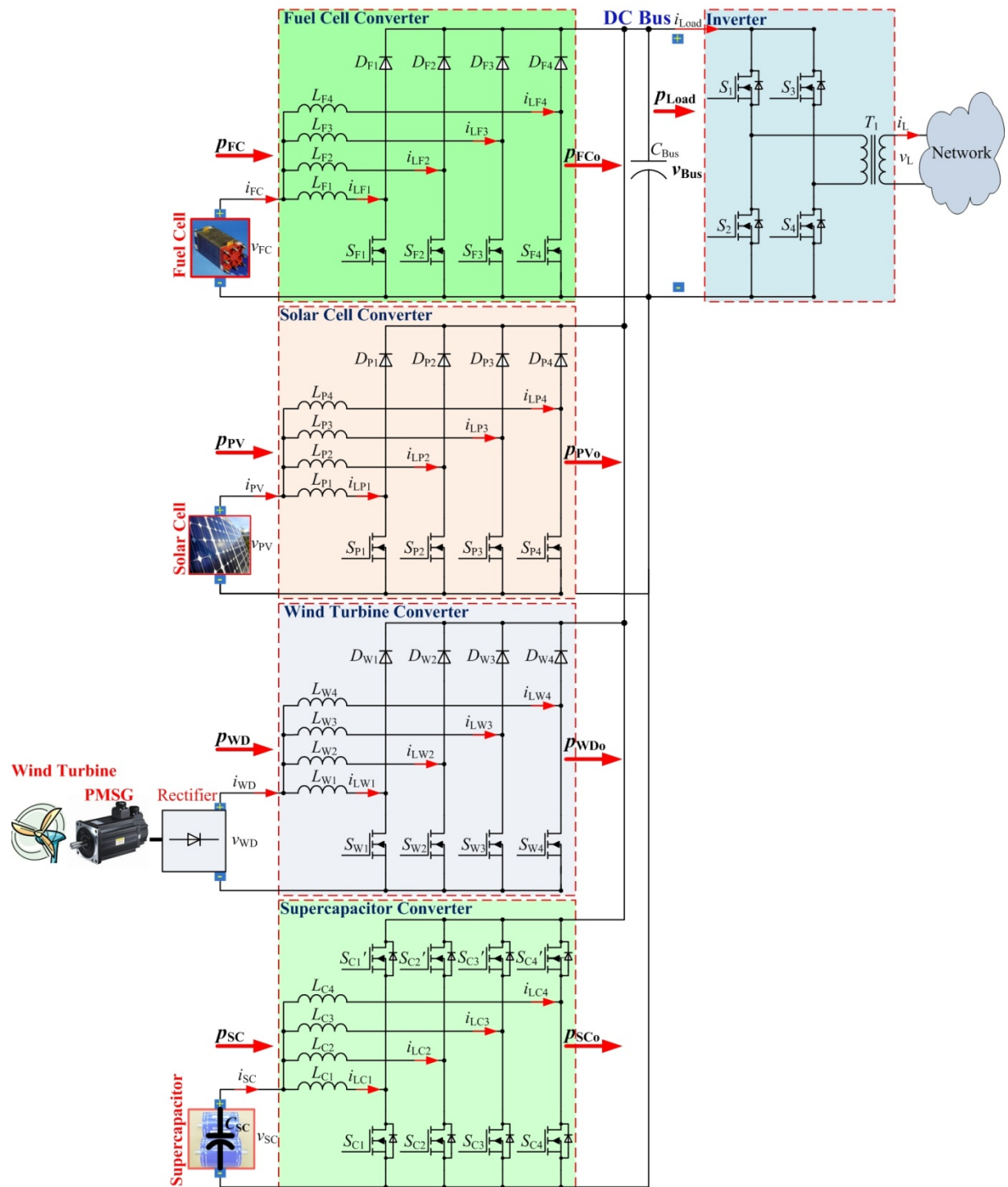
2.2 การบริหารจัดการพลังงานในโรงไฟฟ้า

2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

2.1.1 วงจรกำลัง

โครงสร้างการต่อวงจรกำลังของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมนี้แสดงได้ดังภาพที่ 2-1 ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell converter) คือวงจรบัสที่ขนานกัน 4 ชุด [21] ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell converter) คือวงจรบัสที่ขนานกัน 4 ชุด กังหันลมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ไฟ 3 เฟสต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแล้วต่อกับวงจรบัสที่ขนานกัน 4 ชุด (Wind turbine converter) ตัวแปลงไฟสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor converter) คือวงจรแปลงไฟแบบ 2 ทิศทาง (2-Quadrant Converter) ที่ขนานกัน 4 ชุด

ซึ่ง $p_{Load} (= v_{Bus} \times i_{Load})$, v_{Bus} และ i_{Load} คือกำลังของโหลด แรงดันที่บัสไฟตรงและกระแสที่บัสไฟตรง 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 แรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ตามลำดับ $p_{WD} (= v_{WD} \times i_{WD})$, v_{WD} และ i_{WD} คือกำลัง แรงดันและกระแสของกังหันลมที่ออกจากวงจรเรียงกระแสตามลำดับ $p_{SC} (= v_{SC} \times i_{SC})$, v_{SC} และ i_{SC} คือกำลัง แรงดันและกระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ตามลำดับ p_{FCo} , p_{PVo} , p_{WDo} และ p_{SCo} คือกำลังเอาต์พุตที่ส่งไปยังบัสไฟตรงของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ตามลำดับ



ภาพที่ 2-1 ไดอะแกรมโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่

เพื่อเป็นการป้องกันและการทำงานที่มีความเร็วสูง ตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมและซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะถูกควบคุมด้วยวงปิดของการควบคุมกระแสของแต่ละตัว เพื่อแน่ใจว่าระบบทำงานที่มีเสถียรภาพ (Stability) ความเร็วของวงปิดระบบควบคุมกระแสซึ่งเป็นระบบควบคุมวงในสุด (inner current regulation loops) จะต้องทำงานที่ความเร็วสูงกว่าระบบควบคุมวงปิดของระบบควบคุมวงนอก (outer control loops) [22] ระบบควบคุมกระแสนี้จะรับคำสั่งอ้างอิง (References) ที่สำคัญคือกระแสคำสั่งของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ i_{SCREF} กระแสคำสั่งของเซลล์เชื้อเพลิง i_{FCREF} กระแสคำสั่งของเซลล์แสงอาทิตย์ i_{PVREF} และกระแสคำสั่งของกังหันลม i_{WDREF} กระแสคำสั่งทั้งสี่นี้จะถูกกำหนดมาจากตัวควบคุมบริหารจัดการพลังงานทั้งระบบ ซึ่งจะนำเสนอต่อไป

2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแหล่งจ่ายไฟแบบผสม

เราพิจารณาให้กระแสของเซลล์เชื้อเพลิง กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสของกังหันลม และกระแสของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ทำงานตามกระแสคำสั่งอย่างรวดเร็ว ดังนั้น

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

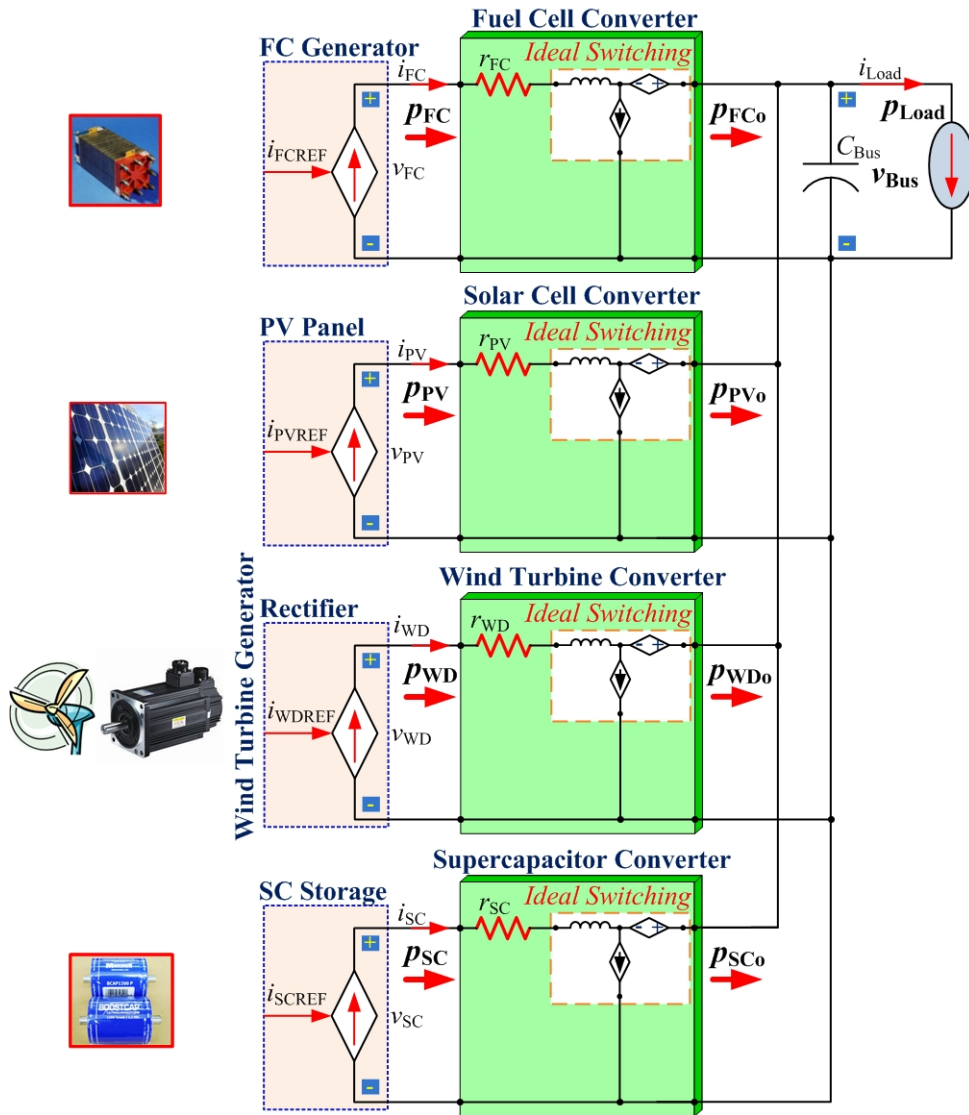
$$i_{PV} = i_{PVREF} = \frac{P_{PV}}{v_{PV}} = \frac{P_{PVREF}}{v_{PV}} \quad (2-2)$$

$$i_{WD} = i_{WDREF} = \frac{P_{WD}}{v_{WD}} = \frac{P_{WDREF}}{v_{WD}} \quad (2-3)$$

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

เป็นผลทำให้กระแสของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมและซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ทำงานเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมได้ (Controlled current sources) แสดงได้ดังภาพที่ 2-2 เราพิจารณาให้มีค่าสูญเสียในตัวแปลงไฟแต่ละตัวเป็นตัวต้านทานที่มีค่าสูญเสียคงที่คือ r_{FC} , r_{PV} , r_{WD} และ r_{SC} ของตัวแปลงไฟของเซลล์เชื้อเพลิง ของตัวแปลงไฟของเซลล์แสงอาทิตย์ ของตัวแปลงไฟของกังหันลมและของตัวแปลงไฟของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ ตามลำดับ

พลังงานไฟฟ้าที่คาปาซิเตอร์ในบัสไฟตรง (E_{Bus}) และพลังงานไฟฟ้าที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (E_{SC}) สามารถเขียนได้ดังนี้



ภาพที่ 2-2 วงจรเทียบเคียงของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมที่นำเสนอ

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

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

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

$$E_T = \frac{1}{2} C_{\text{Bus}} v_{\text{Bus}}^2 + \frac{1}{2} C_{\text{SC}} v_{\text{SC}}^2 \quad (2-7)$$

ดังแสดงในภาพที่ 2-2 สามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ของพลังงานไฟฟ้าที่คาปาซิเตอร์ในบัสไฟตรง (E_{Bus}) กับ p_{FCo} , p_{PVo} , p_{WDo} , p_{SCo} , และ p_{Load} ได้ดังนี้

$$\dot{E}_{Bus} = p_{FCo} + p_{PVo} + p_{WDo} + p_{SCo} - p_{Load} \quad (2-8)$$

ซึ่ง

$$p_{FCo} = p_{FC} - r_{FC} \left(\frac{p_{FC}}{v_{FC}} \right)^2 \quad (2-9)$$

$$p_{PVo} = p_{PV} - r_{PV} \left(\frac{p_{PV}}{v_{PV}} \right)^2 \quad (2-10)$$

$$p_{WDo} = p_{WD} - r_{WD} \left(\frac{p_{WD}}{v_{WD}} \right)^2 \quad (2-11)$$

$$p_{SCo} = p_{SC} - r_{SC} \left(\frac{p_{SC}}{v_{SC}} \right)^2 \quad (2-12)$$

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

$$p_{SC} = v_{SC} \cdot i_{SC} = \sqrt{\frac{2E_{SC}}{C_{SC}}} \cdot i_{SC} \quad (2-14)$$

2.2 การบริหารจัดการพลังงานในระบบจ่ายไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

2.2.1 พลังงานสมดุล

วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือความมีเสถียรภาพ (stability) ความแข็งแกร่ง (robustness) ประสิทธิภาพ (high overall efficiency) และการทำงานที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดและชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ระบบควบคุมแบบหลายตัวแปรนี้จึงต้องมีคำสั่งอ้างอิงของแรงดันที่บัสไฟตรง (v_{BusREF}) (แทนพลังงานที่บัสไฟตรง (E_{Bus}) ที่เราเรียกว่า “การมีเสถียรภาพที่บัสไฟตรง *DC link stabilization*”) และคำสั่งอ้างอิงของแรงดันที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (v_{SCREF}) (แทนพลังงานที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (E_{SC}) ที่เราเรียกว่า “*supercapacitor state-of-charge SOC*”)

งานวิจัยนี้กำหนดให้เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกควบคุมเป็นแหล่งจ่ายหลักที่หนึ่ง กังหันลมจะถูกควบคุมเป็นแหล่งจ่ายหลักที่สอง เซลล์เชื้อเพลิงทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟเมื่อพลังงานในสถานะอยู่ตัวไม่พอกจากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม ขณะที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งพลังงานที่มี

ความเร็วสูงมากๆ จะช่วยจ่ายไฟช่วงไดนามิกส์สูงๆ ดังนั้นหลักการบริหารจัดการพลังงานในระบบคือให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์จ่ายไฟเพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัสไฟตรง ส่วนโซลาร์เซลล์ กังหันและเซลล์เชื้อเพลิง (เป็นเครื่องกำเนิดพลังงานที่ช้ากว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์) ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่บัสไฟตรงและที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์

2.2.2 พิสูจน์การมีคุณสมบัติแบบ flatness ของแหล่งจ่ายแบบผสม

เพื่อยืนยันการมีคุณสมบัติแบบ *flatness* ดังได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 1.6 จะถูกพิสูจน์ดังต่อไปนี้ เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟที่บัสไฟตรงและที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ บนพื้นฐานของทฤษฎีการควบคุมแบบ *flatness* ตัวแปรเอาต์พุต (y) ตัวแปรควบคุมอินพุต (u) และตัวแปรสเตต (x) ถูกกำหนดดังนี้

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\text{Bus}} \\ E_T \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{SCREF}} \\ P_{\text{TREF}} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\text{Bus}} \\ v_{\text{SC}} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

ซึ่ง p_{TREF} คือกำลังไฟรวมจากโซลาร์เซลล์ กังหันลมและเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นตัวแปรสเตตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2y_1}{C_{\text{Bus}}}} \\ \sqrt{\frac{2(y_2 - y_1)}{C_{\text{SC}}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1(y_1) \\ \varphi_2(y_1, y_2) \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

ตัวแปรอินพุต (u) สามารถคำนวณได้จากตัวแปรเอาต์พุตตัว (y) และอนุพันธ์เทียบกับเวลา คือ

$$u_1 = 2p_{SCLim} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\dot{y}_1 + \sqrt{\frac{2y_1}{C_{Bus}}} \cdot i_{Load} - p_{FCo} - p_{PVo} - p_{WDo}}{p_{SCLim}}} \right] \quad (2-19a)$$

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

$$u_1 = \dot{y}_1 + p_{Load} - p_{FC} - p_{PV} - p_{WD} \Big|_{Loss=0} \quad (2-19b)$$

$$= p_{SCREF}$$

$$u_2 = 2p_{TMax} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\dot{y}_2 + \sqrt{\frac{2y_1}{C_{Bus}}} \cdot i_{Load}}{p_{TMax}}} \right] \quad (2-20a)$$

$$= \psi_2(y_1, \dot{y}_2) = p_{TREF}$$

$$u_2 = \dot{y}_2 + p_{Load} \Big|_{Loss=0} \quad (2-20b)$$

$$= p_{TREF}$$

ซึ่ง

$$p_{SCLim} = \frac{v_{SC}^2}{4r_{SC}}, \quad p_{TMax} = \frac{v_T^2}{4r_T} \quad (2-21)$$

ขณะที่ p_{SCLim} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกจำกัดจากตัวแปลงไฟของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ p_{TMax} คือเทียบเคียงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกจำกัดจากตัวแปลงไฟของโซลาร์เซลล์ กังหันลมและเซลล์เชื้อเพลิง v_T คือแรงดันไฟฟ้าเทียบเคียงจากแหล่งจ่ายไฟจากโซลาร์เซลล์ กังหันลมและเซลล์เชื้อเพลิงและ r_T คือค่าตัวต้านทานเทียบเคียงในตัวแปลงไฟของโซลาร์เซลล์ กังหันลมและเซลล์เชื้อเพลิง

อันที่จริงแล้ว

$$p_{TMax} = p_{FCMax} + p_{PVMMax} + p_{WDMMax} \quad (2-22)$$

ซึ่ง p_{FCMax} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์เชื้อเพลิง p_{PVMMax} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากโซลาร์เซลล์ และ p_{WDMMax} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกังหันลม

2.2.3 กฎการควบคุมและเสถียรภาพ (Control Law and Stability)

จากสมการที่ (1.15) กฎการควบคุมพลังงานแสดงได้ดังนี้ [23], [24]

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_1 = \dot{y}_{1REF} + K_{11}(y_{1REF} - y_1) + K_{12} \int_0^t (y_{1REF} - y_1) d\tau \quad (2-23)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_2 = \dot{y}_{2REF} + K_{21}(y_{2REF} - y_2) \quad (2-24)$$

ซึ่ง y_{1REF} คือคำสั่งอ้างอิงของตัวแปรเอาต์พุตตัวที่ 1 (พลังงานที่คาปาซิเตอร์ที่บัสไฟตรง) และ y_{2REF} คือคำสั่งอ้างอิงของตัวแปรเอาต์พุตตัวที่ 2 (พลังงานรวมที่คาปาซิเตอร์ที่บัสไฟตรงกับที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์)

จากสมการที่ (2-23) ถ้ากำหนดให้ $e_1 = y_1 - y_{1REF}$, $K_{11} = 2\zeta\omega_n$ 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 (2-19) จะได้สมการในเทอมของการควบคุมแบบป้อนกลับ เราอาจจะเรียกว่า “inverse dynamics”

$$u_1 = 2p_{SCLim} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{equ.(2-23) + p_{Load} - p_{FCo} - p_{PVo} - p_{WDo}}{p_{SCLim}} \right)} \right] \quad (2-26a)$$

$$u_1 = equ.(2-23) + p_{Load} - p_{FC} - p_{PV} - p_{WD} \Big|_{Loss=0} \quad (2-26b)$$

เช่นเดียวกันจากสมการที่ (2-24) ถ้ากำหนดให้ $e_2 = y_2 - y_{2REF}$, $K_{21} = 1/\tau_S$ จะได้

$$\tau_S \cdot \dot{e}_2 + e_2 = 0 \quad (2-27)$$

แทน $\dot{y}_2$ ลงในสมการที่ (2-20) จะได้สมการในเทอมของการควบคุมแบบป้อนกลับ ที่เรียกว่า “inverse dynamics”

$$u_2 = 2p_{TMax} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{equ.(2-24) + p_{Load}}{p_{TMax}} \right)} \right] \quad (2-28a)$$

$$u_2 = equ.(2-24) + p_{Load} \Big|_{Loss=0} \quad (2-28b)$$

ภาพที่ 2-3 ได้อธิบายถึงแนวคิดระบบควบคุมที่ได้นำเสนอสำหรับแหล่งจ่ายไฟจากพลังงานทดแทนที่ได้อธิบายข้างบน กฎการควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรงสร้างกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ p_{SCREF} สัญญาณ p_{SCREF} นี้จะถูกหารด้วยแรงดันที่วัดมาจากซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ v_{SC} และจะจำกัดแรงดันของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ให้อยู่ในช่วงต่ำสุดและสูงสุด $[V_{SCMin}, V_{SCMax}]$ โดยการจำกัดกระแสชาร์จหรือกระแสคายประจุ (ไม่ได้อธิบายในเอกสารนี้ สามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้จาก [25]) ผลลัพธ์ก็คือได้กระแสอ้างอิงสำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ i_{SCREF}



กฎการควบคุมพลังงานรวมหรือกฎการควบคุมพลังงานสำหรับซูปเปอร์คาปาซิเตอร์กำเนิดกำลังไฟฟ้าอ้างอิงรวม p_{TREF}

- อย่างแรก สัญญาณ p_{TREF} นี้จะถูกพิจารณาให้เป็นกำลังอ้างอิงสำหรับโซลาร์เซลล์ p_{PVREF} สัญญาณนี้จะถูกจำกัดไม่ให้เกินกำลังไฟฟ้าสูงสุด p_{PVMax} ด้วยตัวติดตามกำลังไฟฟ้า (maximum power point tracking MPPT_{PV}) แสดงดังรูปที่ 2-4 [26], [27], [28]
- อย่างที่สอง ความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าอ้างอิงรวม p_{TREF} กับกำลังอ้างอิงสำหรับโซลาร์เซลล์ p_{PVREF} คือกำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับกังหันลม p_{WDDEM} สัญญาณนี้จะถูกจำกัดไม่ให้เกินกำลังไฟฟ้าสูงสุด p_{WDMAX} ด้วยตัวติดตามกำลังไฟฟ้า (maximum power point tracking MPPT_{WD}) แสดงดังรูปที่ 2-5
- อย่างที่สาม ความแตกต่างระหว่าง p_{WDDEM} กับ p_{WDREF} คือกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง p_{FCREF} ในที่นี้ตัวห่นวงลำดับที่ 2 ($D_{FC}(s)$) ถูกเลือกสำหรับการจำกัดไดนามิกส์ของเซลล์เชื้อเพลิง (*FC power dynamic limitation*) [29], [30] แสดงได้ดังนี้

$$D_{FC}(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_{n1}}\right)^2 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n1}}s + 1} \quad (2-29)$$

ซึ่ง ω_{n1} และ ζ_1 คือตัวแปรการควบคุม

```

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 2-4 ฟังก์ชันคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโซลาร์เซลล์ MPPT_{PV} ซึ่ง ΔI_{PV} คือความละเอียดของกระแสที่กำหนด และ Δt คือเวลาชุ่มสำหรับการคำนวณ

```

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

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

   $p_{WDMAX}(t) = v_{WD}(t) \times i_{WDMAX}(t);$ 
   $p_{WDREF}(t) = \min[p_{WDDEM}(t), p_{WDMAX}(t)];$ 
  % Note: Minimum Function
   $v_{WD}(t-\Delta t) = v_{WD}(t);$ 
   $i_{WD}(t-\Delta t) = i_{WD}(t);$ 
END

```

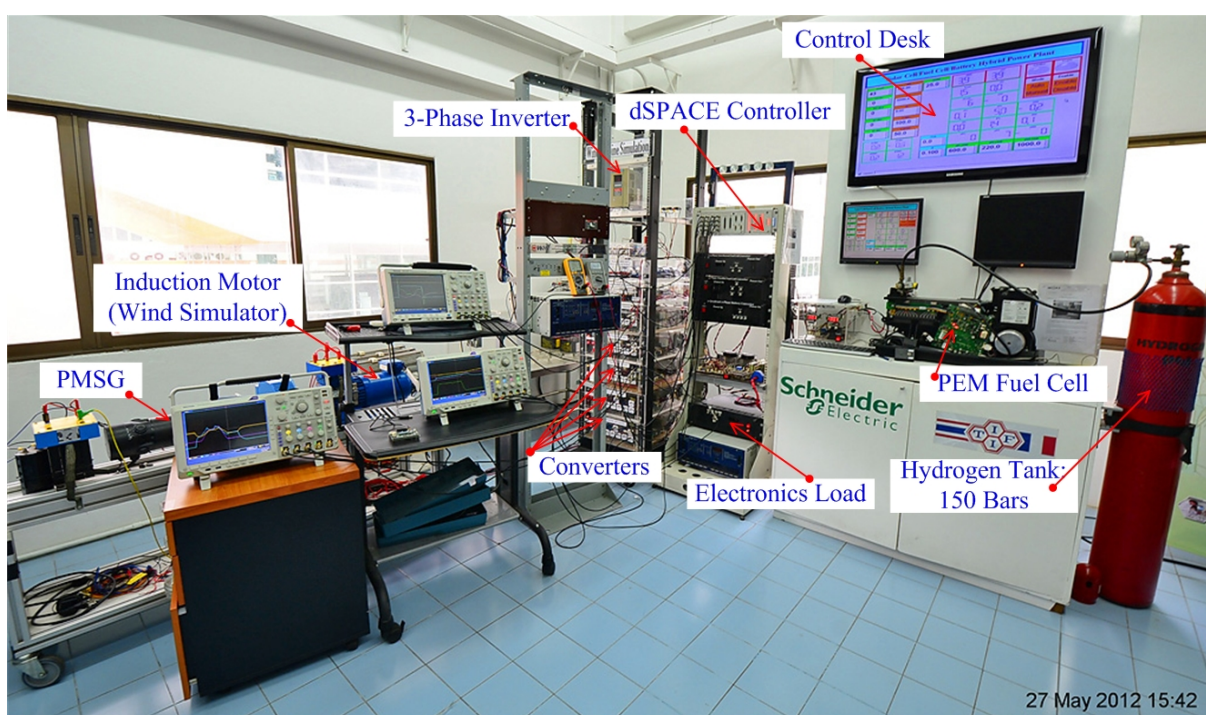
ภาพที่ 2-5 ฟังก์ชันคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลม $MPPT_{WD}$ ซึ่ง ΔI_{WD} คือความละเอียดของกระแสที่กำหนด และ Δt คือเวลาซุ่มสำหรับการคำนวณ

วิธีการทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากขั้นตอนการออกแบบและดำเนินงานตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 เมื่อนำวงจรต่าง ๆ มาประกอบรวมกันเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานของวงจรที่ได้ออกแบบไว้และผลการทดสอบการทำงานของวงจรต่างๆ ดังนี้

3.1 รายละเอียดชุดทดลอง

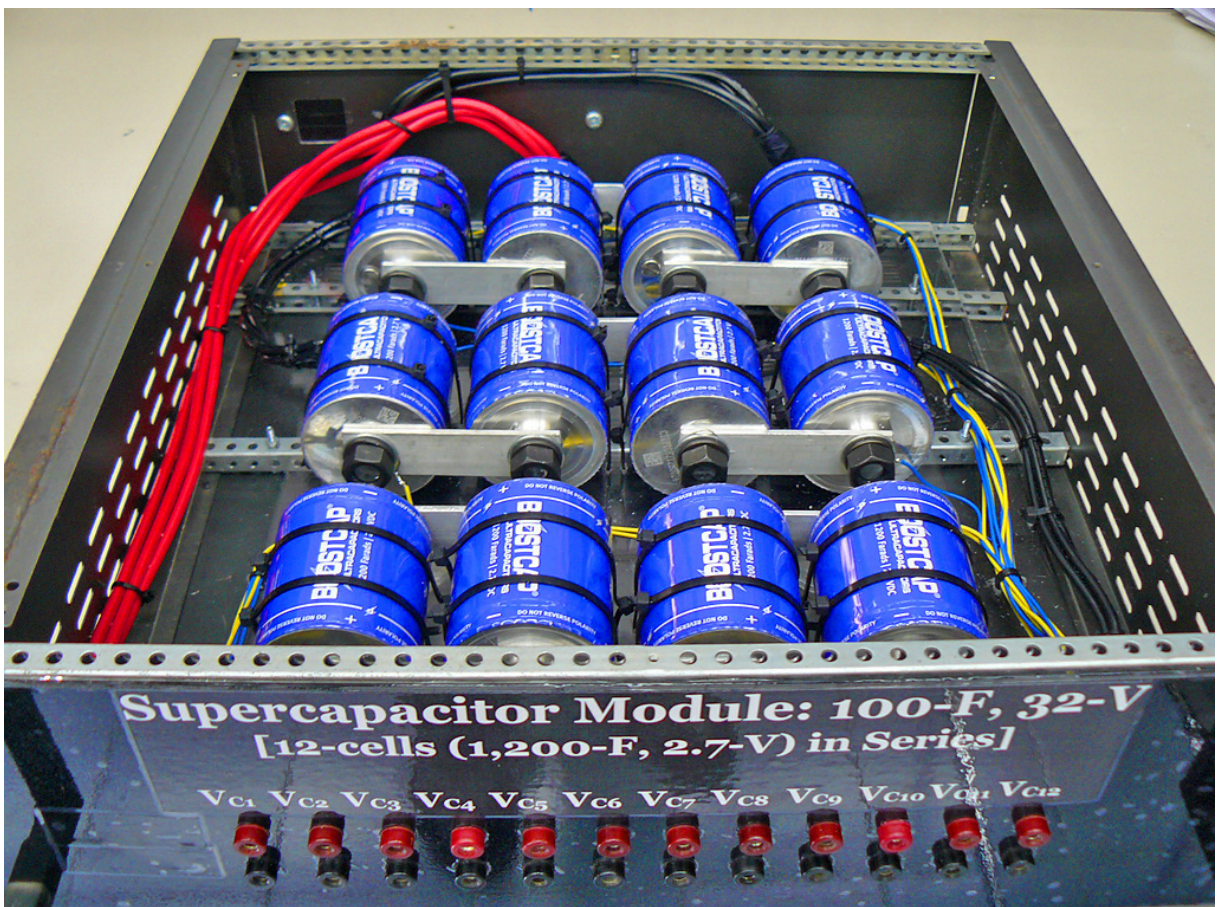
ชุดทดลองระบบจ่ายไฟแบบผสมต้นแบบขนาดเล็กแสดงดังภาพที่ 3-1 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Ballard Nexa fuel cell system) ระบบกังหันลม แผงโซลาร์เซลล์ (ติดตั้งบนดาดฟ้าสถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส) และโมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์แสดงดังภาพที่ 3-1 ถึงภาพที่ 3-3 ตามลำดับ รายละเอียดแหล่งจ่ายแต่ละตัวแสดงในตารางที่ 3-1 ขณะที่ภาพถ่ายของตัวแปลงไฟแต่ละตัวที่ออกแบบและสร้างประกอบเป็นโรงไฟฟ้าต้นแบบแสดงดังภาพที่ 3-4 ถึงภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-1 ชุดทดลองโรงไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็กจ่ายไฟโดยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานไฮโดรเจน พลังงานลมและแบตเตอรี่รีซินิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์



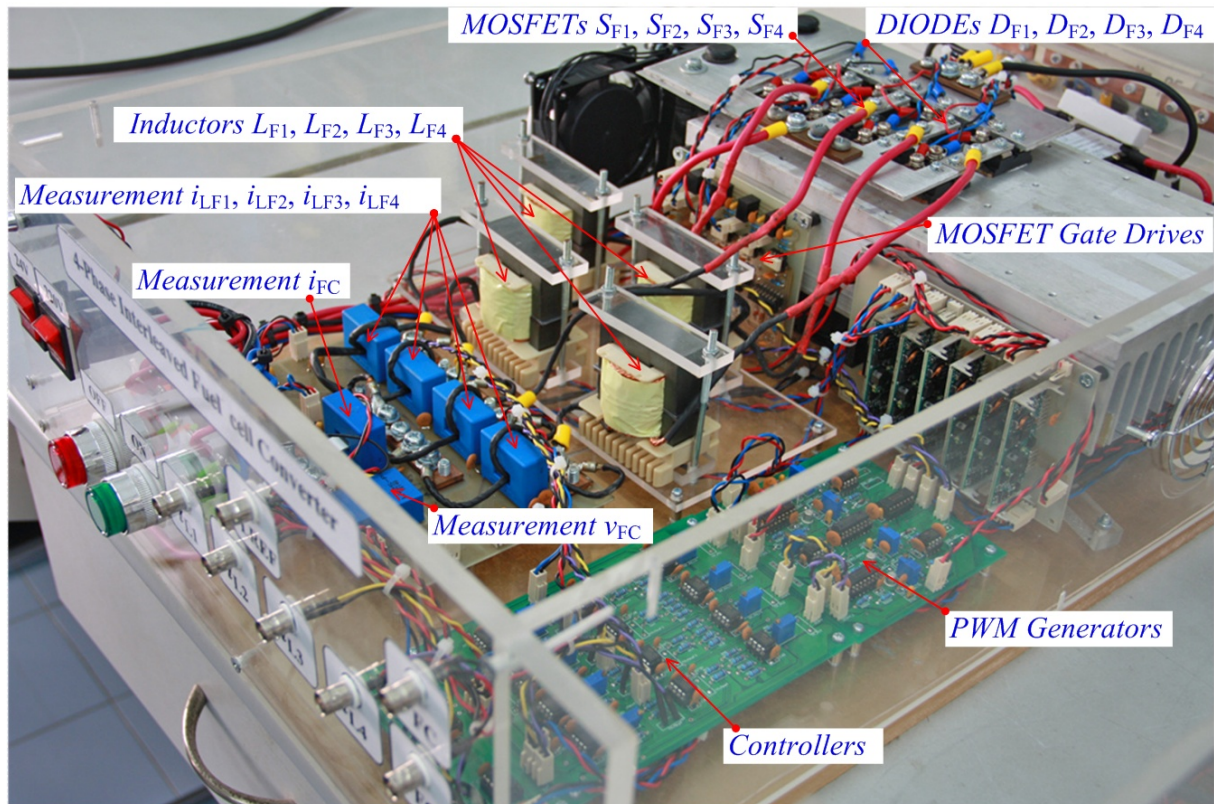
ภาพที่ 3-2 แผงโซลาร์เซลล์ (ติดตั้งบนอาคารพาณิชย์สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส)



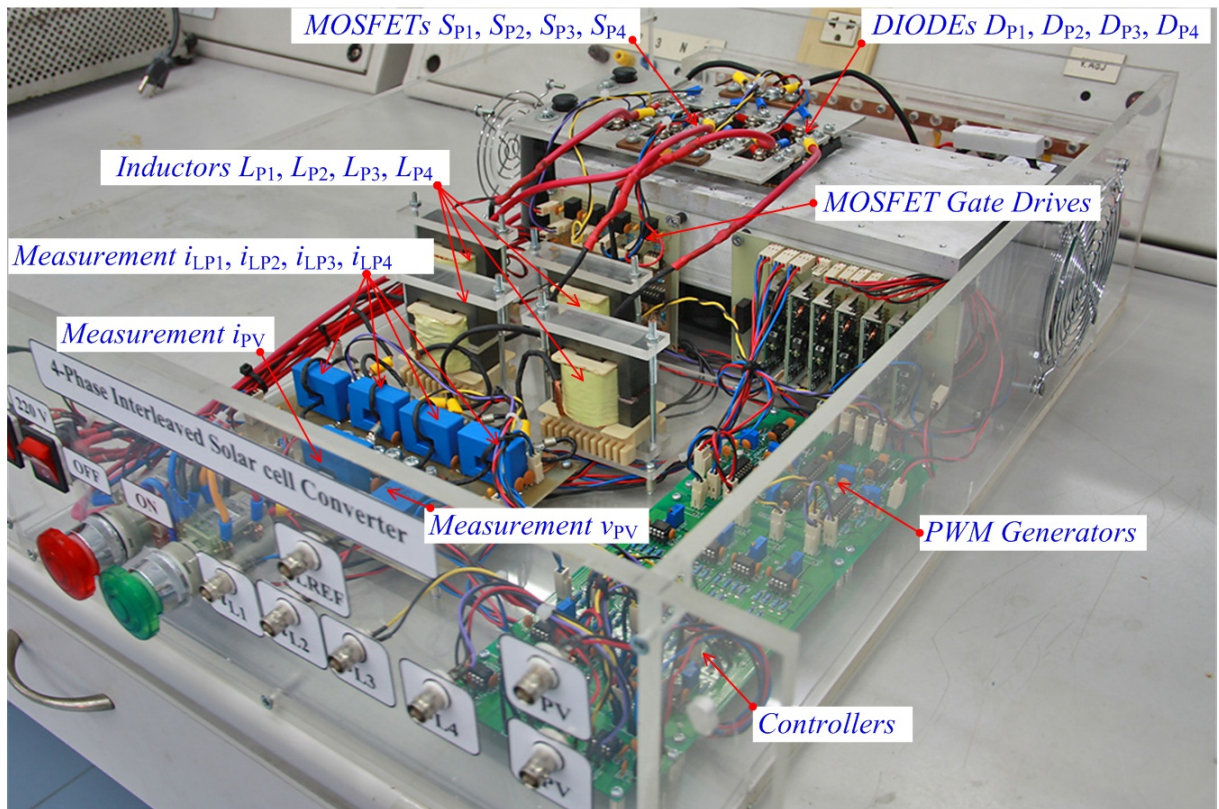
ภาพที่ 3-3 โมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดแหล่งจ่ายไฟแต่ละตัว

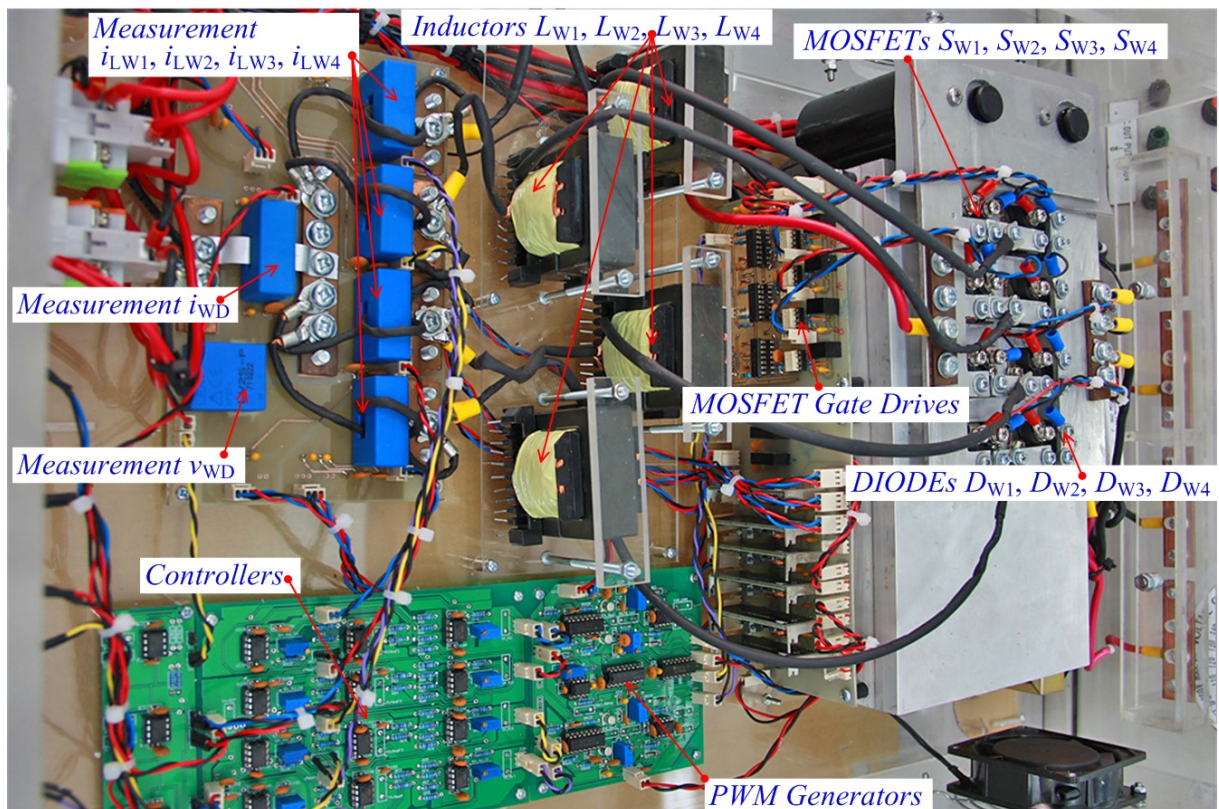
Fuel Cell System (by Ballard Power Systems Inc):		
Rated Power	1,200	W
Rated Current	46	A
Rated Voltage	26	V
Photovoltaic Array (by Ekarat Solar Company):		
Number of Panels in Parallel	4	
Panel Open Circuit Voltage	33.5	V
Panel Rated Voltage	26	V
Panel Rated Current	7.7	A
Panel Rated Power	200	W
Array Rated Power	800	W
Wind Turbine:		
Permanent Magnet	1,000	W
Synchronous Generator (PMSG)		
Speed	1,500	rpm
Supercapacitor Bank (by Maxwell Technologies Comp):		
(Cell Model: BCAP1200)		
Number of Cells in Series	12	
Cell Capacity	1,200	F
Cell Maximum Voltage	2.7	V
Bank Capacity (C_{SC})	100	F
Bank Maximum Voltage	32	V



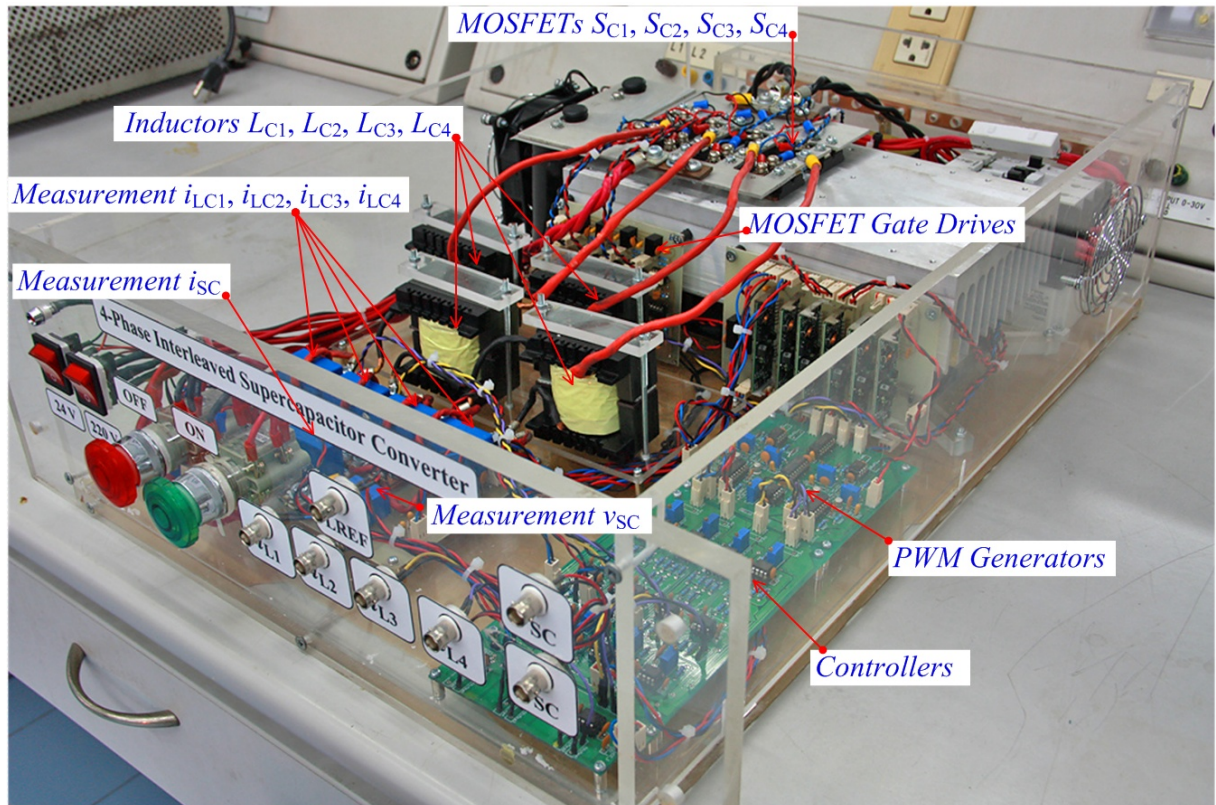
ภาพที่ 3-4 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Converter)



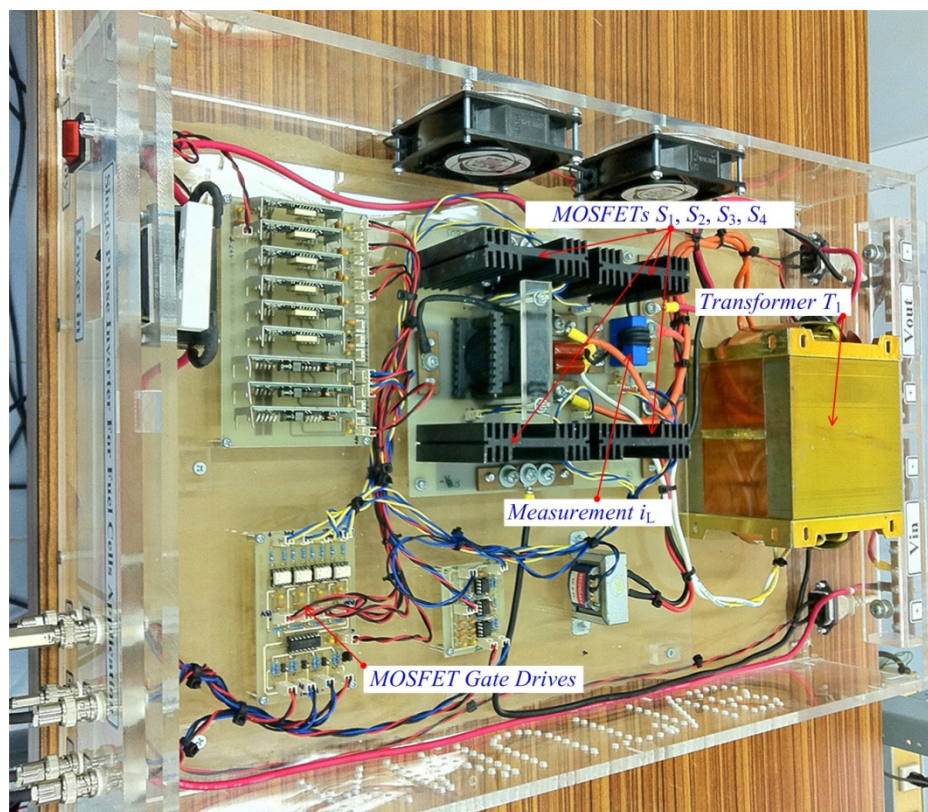
ภาพที่ 3-5 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับโซลาร์เซลล์ (Solar Cell Converter)



ภาพที่ 3-6 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับกังหันลม (Wind Turbine Converter)



ภาพที่ 3-7 ภาพถ่ายตัวแปลงไฟสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor Converter)



ภาพที่ 3-8 ภาพถ่ายอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

3.2 ผลการทดลองตัวแปลงไฟ

เมื่อตัวแปลงไฟแต่ละตัวถูกสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะมีการทดสอบอิสระจากกัน ถ้าผลการทดลองได้ตามต้องการ จะนำตัวแปลงไฟแต่ละตัวต่อรวมกันเป็นโรงไฟฟ้าต้นแบบ

3.2.1 ตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

เพื่อแสดงถึงลักษณะสมบัติของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะอยู่ตัว ภาพที่ 3-9 ถึงภาพที่ 3-11 แสดงสัญญาณขณะที่ตัวแปลงไฟดึงกระแสจากเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 8 A, 20 A และ 44 A ตามลำดับ

หมายเหตุ ตัวแปลงไฟต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงจริง ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1,200 W, 26 V ดังภาพที่ 3-1

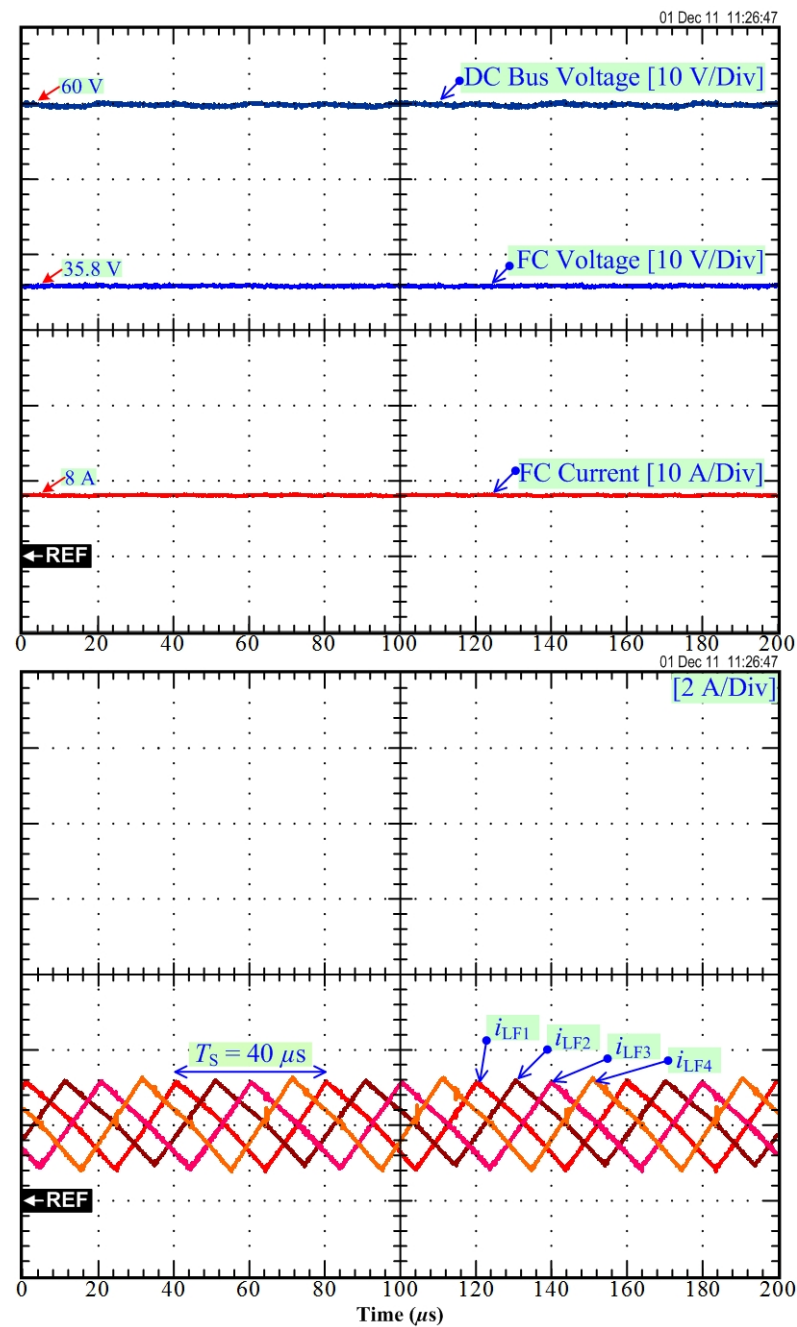
โดยที่จ้อออสซิลโลสโคปแสดงสัญญาณ

- แรงดันที่บัสไฟตรง (DC Bus Voltage)
- แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Voltage)
- กระแสของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Current) และ
- กระแสของตัวเหนี่ยวนำทั้งสี่เฟสคือ i_{LF1} , i_{LF2} , i_{LF3} , i_{LF4} (อ้างถึงภาพที่ 2-1)

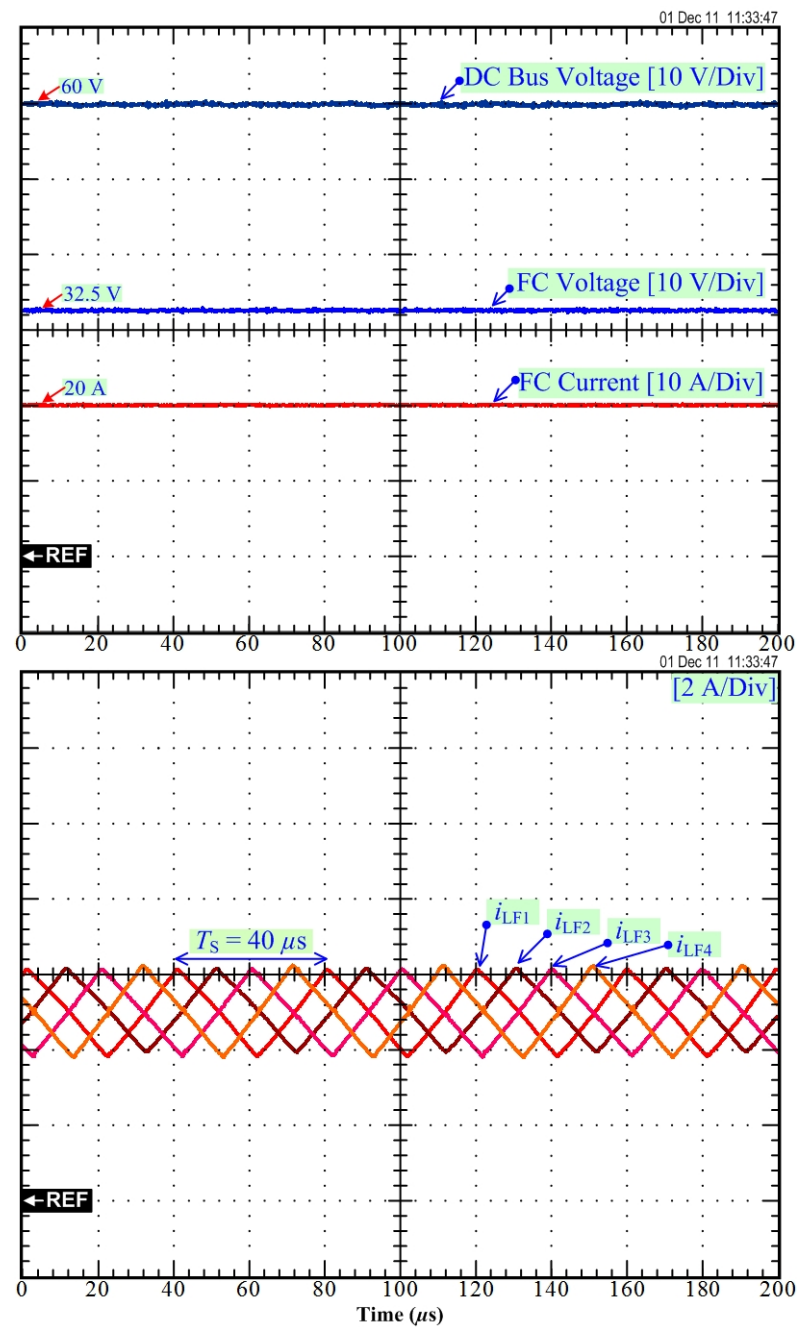
จากภาพทั้ง 3 ภาพ จะเห็นได้ว่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำทั้งสี่เฟสคือ i_{LF1} , i_{LF2} , i_{LF3} , i_{LF4} มีมุมห่างกัน 90 องศา (สวิตช์แบบเหลื่อมเฟส 4 เฟส) ด้วยความถี่สวิตช์ (Switching Frequency) ที่ 25 kHz

หมายเหตุ การทดลองตัวแปลงไฟจะอยู่บนเงื่อนไขที่โหลดจะปรับให้ได้แรงดันที่บัสไฟตรงเท่ากับ 60 V ซึ่งเท่ากับแรงดันพิกัดของระบบ

จะสังเกตเห็นได้ว่ากระแสในแต่ละเฟสมีการกระเพื่อม (ripple current) ซึ่งเป็นธรรมชาติของวงจร แต่กระแสของเซลล์เชื้อเพลิงคือผลรวมของกระแสทั้งสี่เฟส ซึ่งกระแสกระเพื่อมของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเป็นศูนย์เพราะการหักล้างกันของการเหลื่อมเฟสซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของเทคนิคการเหลื่อมเฟส



ภาพที่ 3-9 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ กระแสอ้างอิงเท่ากับ 8 A ขณะที่แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 35.8 V และแรงดันที่บัสไฟตรง เท่ากับ 60 V



ภาพที่ 3-10 ผลการทดลองจริง สัญญาณที่สภาวะอยู่ตัวของตัวแปลงไฟสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ กระแสอ้างอิงเท่ากับ 20 A ขณะที่แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 32.5 V และแรงดันที่บัสไฟตรง เท่ากับ 60 V