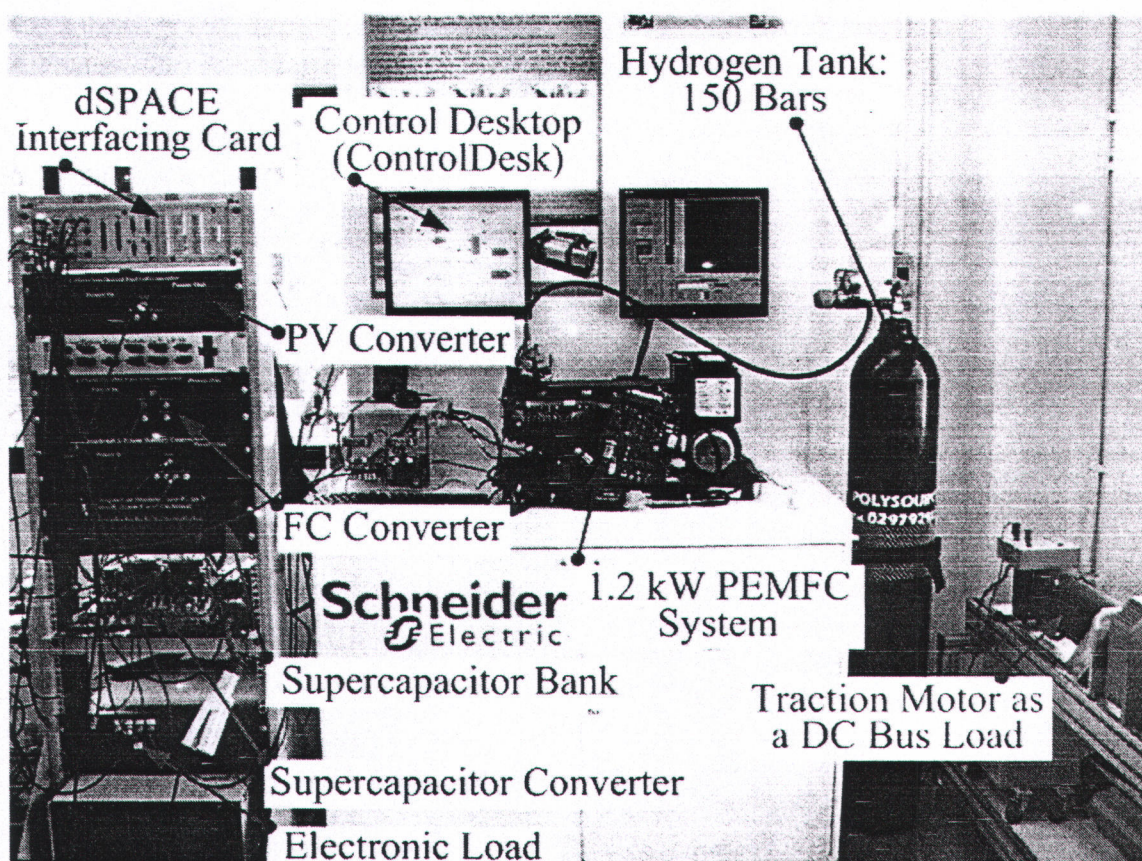


วิธีการทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

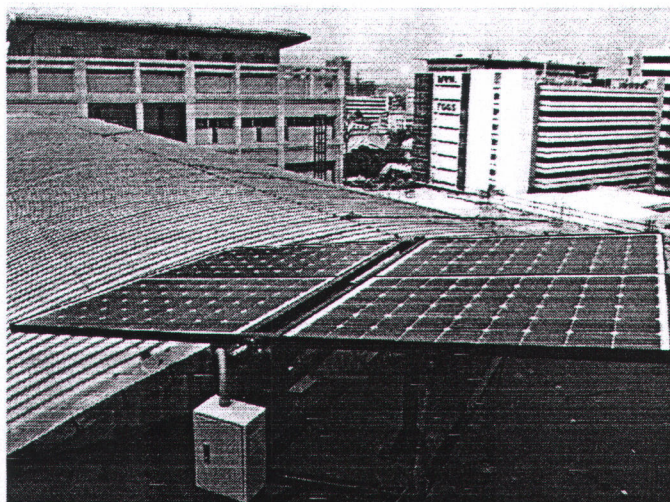
จากขั้นตอนการออกแบบและดำเนินงานตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 เมื่อนำวงจรต่าง ๆ มาประกอบรวมกันเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานของวงจรที่ได้ออกแบบไว้และผลการทดสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ดังนี้

3.1 รายละเอียดชุดทดลอง

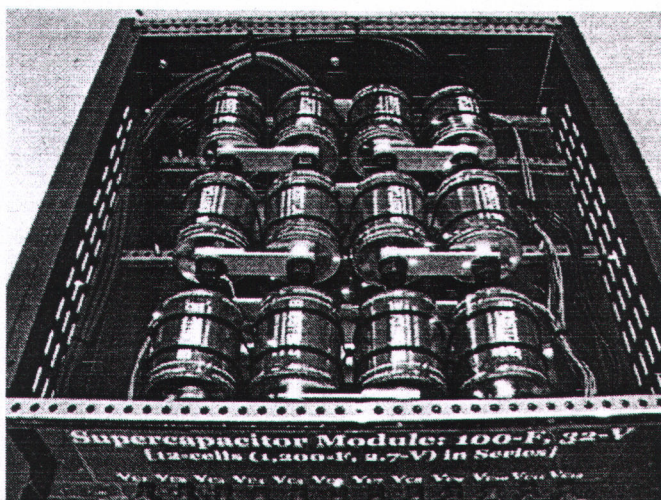
ชุดทดลองระบบจ่ายไฟแบบผสมต้นแบบขนาดเล็กแสดงดังภาพที่ 3-1 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Ballard Nexa fuel cell system) แผงโซลาร์เซลล์ (ติดตั้งบนอาคารพาณิชย์เทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส) และโมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์แสดงดังภาพที่ 3-1 ถึงภาพที่ 3-3 ตามลำดับ รายละเอียดแหล่งจ่ายแต่ละตัวแสดงในตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ชุดทดลองระบบจ่ายไฟแบบผสมต้นแบบขนาดเล็ก



ภาพที่ 3-2 แผงโซลาร์เซลล์ (ติดตั้งบนดาดฟ้าสถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส)

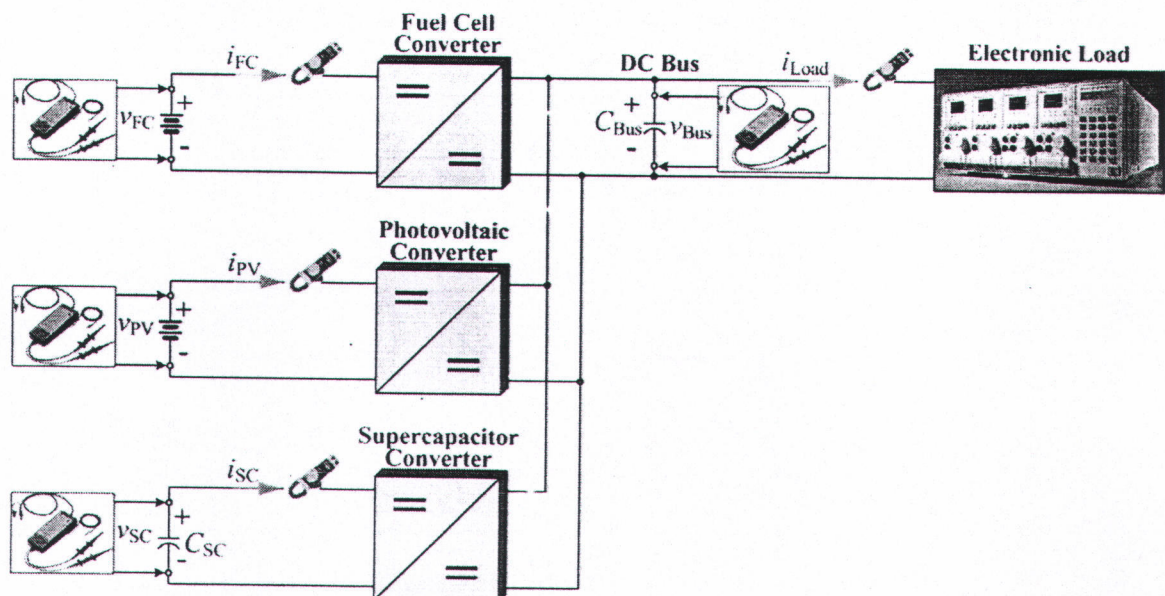


ภาพที่ 3-3 โมดูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์

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
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

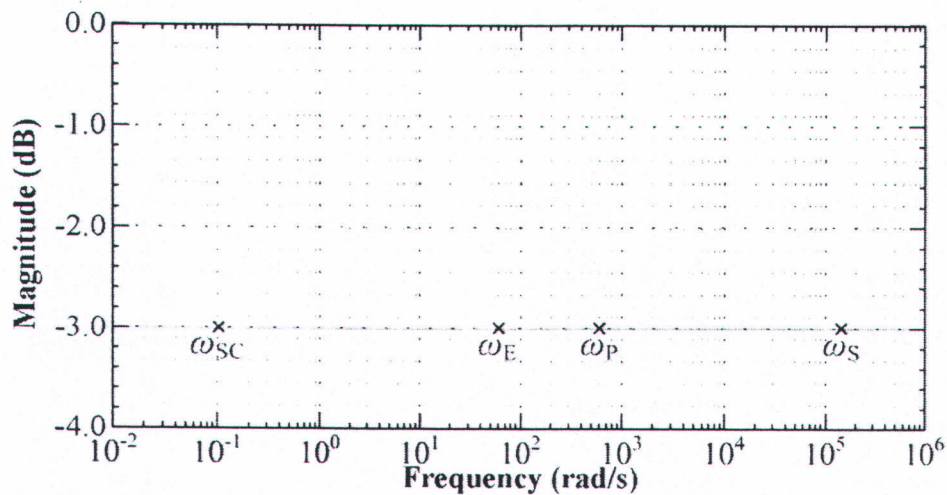
แรงดันที่บัสไฟตรงจะถูกควบคุมที่ 60 V และบัสไฟตรงจะถูกต่อเข้ากับโหลดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อจำลองสถานะต่างๆ ของบัสไฟตรง การวัดค่ากระแสของเซลล์เชื้อเพลิง (i_{FC}) กระแสของโซลาร์เซลล์ (i_{PV}) กระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (i_{SC}) กระแสของโหลด (i_{Load}) แรงดันที่บัสไฟตรง (V_{Bus}) แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง (V_{FC}) แรงดันของโซลาร์เซลล์ (V_{PV}) และแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (V_{SC}) จะถูกวัดด้วย zero-flux Hall effect sensors ตำแหน่งจุดวัดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3-4 ระบบควบคุมพลังงานทั้งระบบถูกสร้างในตัวควบคุมแบบ real time ในการ์ด dSPACE DS1104 (ดังภาพที่ 3-1) ผ่านตัวคำนวณใน Matlab-Simulink ที่มีความถี่สุ่ม (sampling frequency) ที่ 25 kHz



ภาพที่ 3-4 จุดวัดแรงดันและกระแสของชุดทดลอง

3.2 รายละเอียดระบบควบคุม

อัตราขยายของตัวควบคุม $K_{11} = 450 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ และ $K_{12} = 22,500 \text{ rad}^2\cdot\text{s}^{-2}$ เพื่อให้ระบบมีอัตราหน่วง (damping ratio) เท่ากับ 1.5 และมีความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) เท่ากับ $150 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ซึ่งจะทำให้ cutoff frequency (ω_E) ของวงปิดของระบบควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ $60 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า cutoff frequency (ω_P) ของวงปิดของระบบควบคุมกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (ω_P) มีค่าเท่ากับ $600 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (ซึ่งวงปิดของระบบควบคุมกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะถูกประมาณเป็นตัวแทนลำดับที่ 1 มีค่าคงที่ของเวลา (time constant) เท่ากับ 2.2 ms ที่ได้จากการทดลอง identification) ดังนั้นระบบควบคุมมีเสถียรภาพ อัตราขยายของตัวควบคุมของวงปิดระบบควบคุมพลังงานรวม (หรือพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์) $K_{21} = 0.1 \text{ W}\cdot\text{J}^{-1}$ ทำให้ cutoff frequency (ω_{SC}) ของวงปิดระบบควบคุมพลังงานรวมเท่ากับ $0.1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ที่ซึ่ง $\omega_{SC} \ll \omega_E$ เพื่อเป็นการการันตีสำหรับการมีเสถียรภาพของทั้งระบบควบคุม ดังนั้น cutoff frequency ของทุกวงปิดแสดงได้ดังภาพที่ 3-5 ดังนั้นพารามิเตอร์ของระบบควบคุมทั้งสองวงแสดงดังตารางที่ 3-2 และ 3-3



ภาพที่ 3-5 การกำหนดค่าของตัวควบคุมโดยเลือกกำหนดค่า cutoff frequency ที่ซึ่ง ω_s คือความถี่สวิทช์ของตัวแปลงไฟของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 25 kHz ($157,080 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) ω_p คือ cutoff frequency ของวงปิดของระบบควบคุมกำลังของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าเท่ากับ $600 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ω_E คือ cutoff frequency ของวงปิดของระบบควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ $60 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ω_{sc} และ คือ cutoff frequency ของวงปิดของระบบควบคุมพลังงานรวม (หรือพลังงานของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์)

ตารางที่ 3-2 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมพลังงานที่บัสไฟตรง

V_{BusREF}	60	V
C_{Bus}	12200	μF
K_{11}	450	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
K_{12}	22,500	$\text{rad}^2\cdot\text{s}^{-2}$
r_{FC}	0.13	Ω
r_{SO}	0.10	Ω
r_{SC}	0.08	Ω
V_{SCMax}	32	V
V_{SCMin}	15	V
I_{SCRated}	150	A

ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมพลังงานรวม (หรือพลังงานของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์)

V_{SCREF}	25	V
C_{SC}	100	F
K_{21}	0.1	$\text{W}\cdot\text{J}^{-1}$
p_{FCMin}	0	W
$I_{\text{FCMax}} (\text{Rated})$	46	A
I_{FCMin}	0	A
ζ_1	1	
ω_{n1}	0.4	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

3.3 ผลการทดลอง

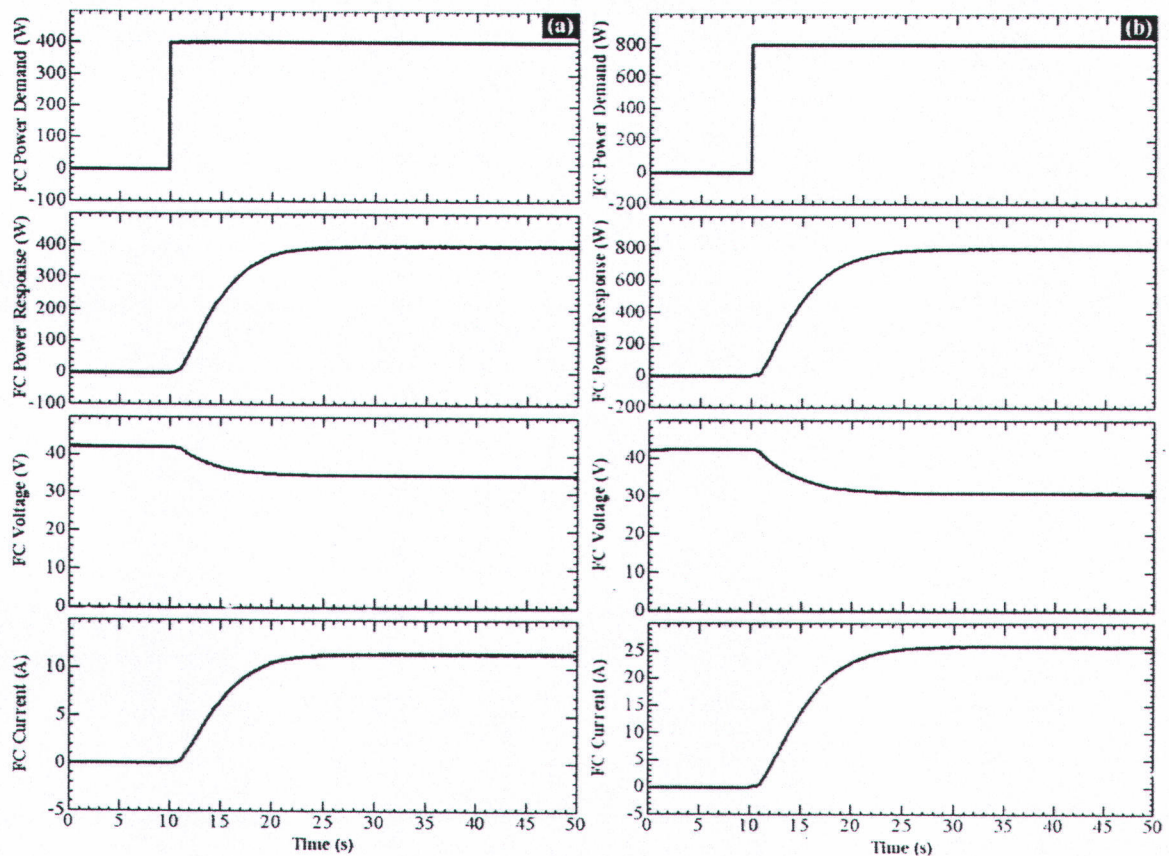
3.3.1 ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของแต่ละแหล่งจ่าย (Power Loop Identification)

เพื่อเป็นการยืนยันถึงไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลัง (หรือกระแส) ของแหล่งจ่ายแต่ละตัว ภาพที่ 3-6 ถึงภาพที่ 3-8 แสดงผลการทดลองที่ทดสอบความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งของกำลังของแต่ละแหล่งจ่าย ภาพที่ 3-6 แสดงการตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งของกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง ในภาพนำเสนอคำสั่งอ้างอิงของกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Power Demand) กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Power Response) แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Voltage) และกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Current) ชัดเจนที่การตอบสนองของกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวแทนลำดับที่ 2 (second order characteristics) เป็นไปตามสมการที่ (2-52) และเห็นได้ชัดที่ไม่มีปรากฏการณ์การกระหายเชื้อเพลิง (fuel starvation phenomenon) เกิดขึ้นในเซลล์ เนื่องจากระบบมีการหน่วงการทำงานของกำลังจากเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้งานเร็วเกินไปนั่นเอง ส่วนในภาพที่ 3-7 แสดงการตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งของกำลังของโซล่าเซลล์ ในภาพนำเสนอคำสั่งอ้างอิงของกำลังของโซล่าเซลล์ (PV Power Demand) กำลังของโซล่าเซลล์ (PV Power Response) แรงดันของโซล่าเซลล์ (PV Voltage) และกระแสของโซล่าเซลล์ (PV Current) สุดท้ายภาพที่ 3-8 แสดงการตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งของกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ในภาพนำเสนอคำสั่งอ้างอิงของกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (PV Power Demand) กำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (PV Power Response) แรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (PV Voltage) และกระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (PV Current) เห็นได้ชัดว่าการตอบสนองของกำลังจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นไปอย่างรวดเร็วมาก มันสามารถจ่ายกำลังไปสู่บัสไฟตรงจาก 0 W ถึง 400 W ใช้เวลาแค่ประมาณ 50 ms เท่านั้น ซึ่งนี่คือจุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่เหนือกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ในด้านไดนามิกส์และ Power Densities

3.3.2 ไดนามิกส์ของการควบคุมบัสไฟตรง

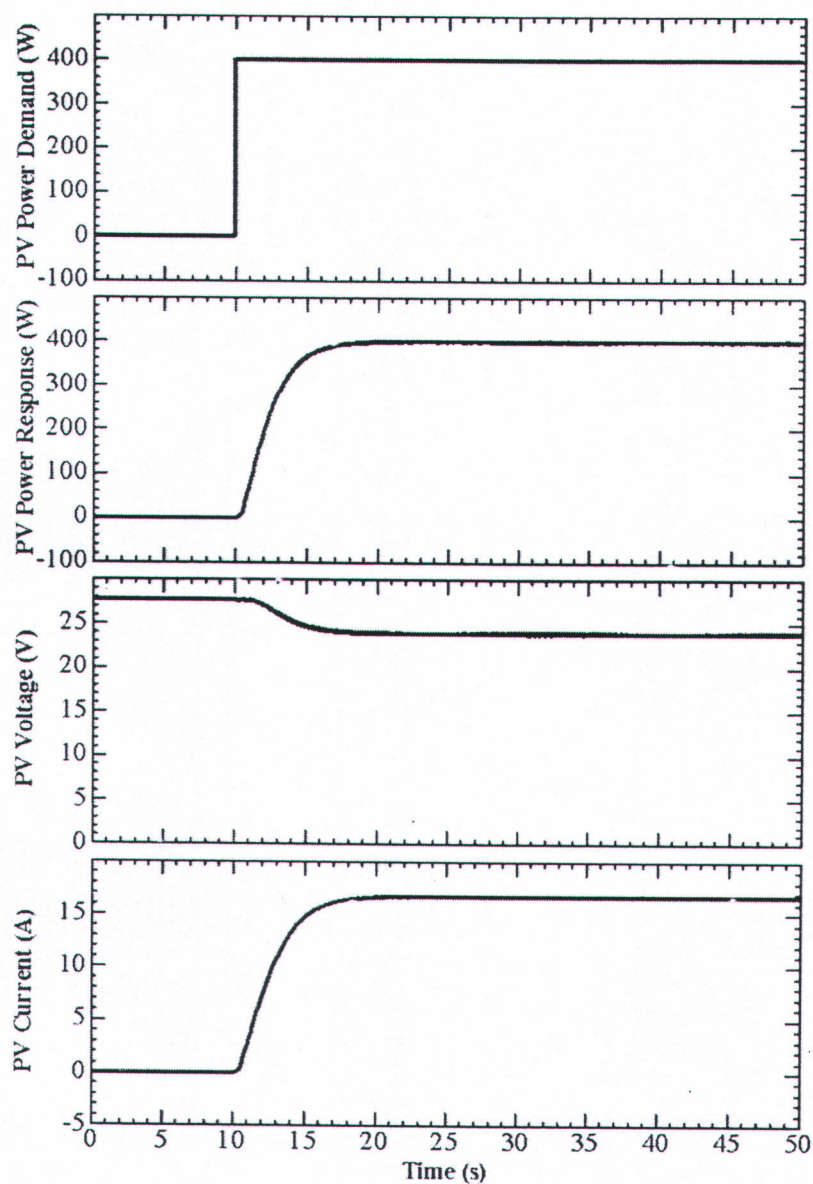
ภาพที่ 3-9 แสดงสัญญาณขณะมีการสลับโหลดขนาดใหญ่ แสดงแรงดันบัสไฟตรง (dc bus voltage) (ซึ่งคือตัวแปรสแตต x_1 นำเสนอแทนตัวแปรเอาต์พุต y_1) โหลด (load power) (หรือก็คือสัญญาณรบกวน) กำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (supercapacitor power) (ซึ่งคือตัวแปรควบคุมที่เป็นอินพุตตัวที่ 1 u_1) และกำลังของโซล่าเซลล์ (PV power) เริ่มต้นขณะที่ไม่มีโหลด ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเต็มแล้ว (นั่นคือ $V_{SCREF} = 25$ V) และบัสไฟตรงถูกควบคุมให้คงที่ที่ 60 V ($V_{BusREF} = 60$ V) เป็นผลทำให้กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ ขณะทดลองกำลังสูงสุดจากโซล่าเซลล์ถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 400 W โดยตัวติดตามกำลังสูงสุด (MPPT) ผลการทดลองแสดงให้เห็นการตอบสนองทางไดนามิกส์ต่อการสลับโหลดขนาดใหญ่เป็นไปตามสมการที่ (2-47) ซึ่งเป็นไปตามลักษณะสมบัติของสมการหน่วงลำดับที่ 2 การแกว่งเล็กน้อยของบัสไฟตรงเพราะว่าอัตราขยาย K_{12} มีค่าสูงและโหลดมีค่าสูงมาก ค่าอัตราขยาย K_{12} สามารถลดลงได้เพื่อลดการแกว่ง อย่างไรก็ตาม มันจะทำให้การตอบสนองช้าลง กฎการควบคุม (control law) แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพและมีการตอบสนองที่ดีที่สุดเพื่อควบคุมแรงดันที่บัสไฟตรงที่ 60 V ถึงแม้ว่าไดนามิกส์ของระบบควบคุมสามารถทำให้ดีขึ้นได้แต่ระบบอาจจะเข้าไปใกล้ขอบของการไม่มีเสถียรภาพได้ (reduced

stability margin) ข้อสังเกต ในทางปฏิบัติการสร้างโหลดที่เป็นสเตปจะทำได้ยากดังแสดงในภาพ และเนื่องจากกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงถูกจำกัดด้านไดนามิกส์ ดังนั้นไดนามิกส์ของโหลดจะจ่ายโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์และโซล่าเซลล์

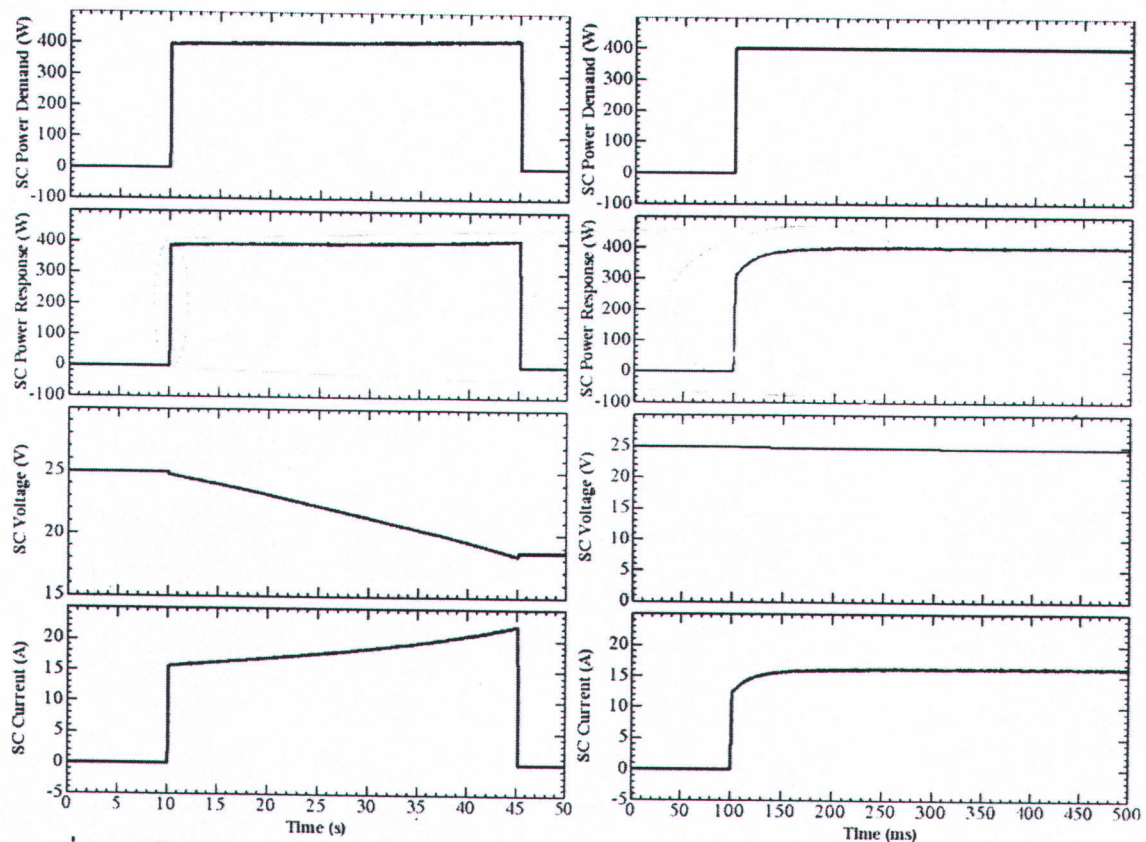


ภาพที่ 3-6 ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง นำเสนอคำสั่งอ้างอิงของกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Power Demand) กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Power Response) แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Voltage) และกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง (FC Current)

- คำสั่งอ้างอิงของกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงสเตปจาก 0 W ไปยัง 400 W ที่เวลา 10 s
- คำสั่งอ้างอิงของกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงสเตปจาก 0 W ไปยัง 800 W ที่เวลา 10 s

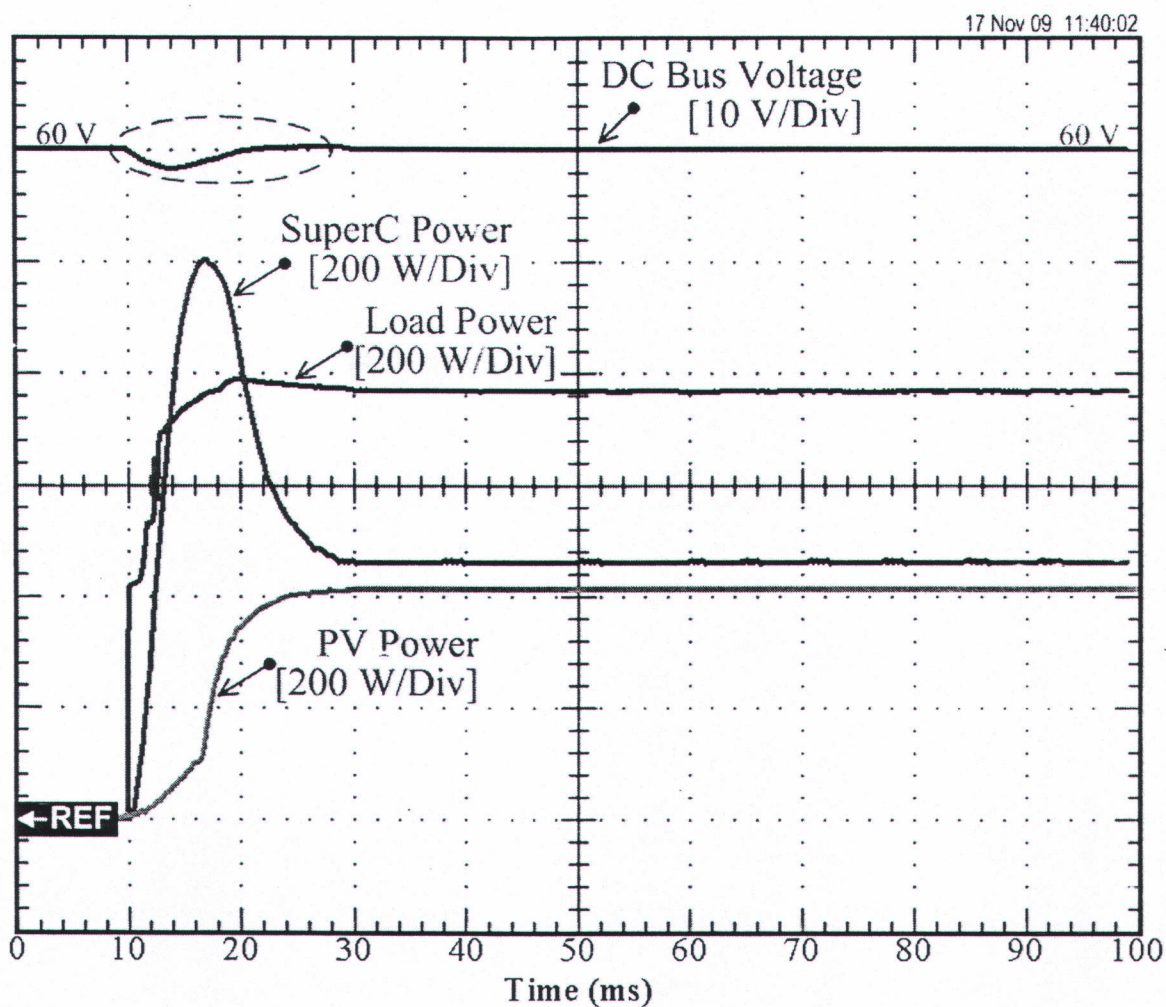


ภาพที่ 3-7 ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของโซลาร์เซลล์ นำเสนอคำสั่งอ้างอิงของกำลังของโซลาร์เซลล์ (PV Power Demand) กำลังของโซลาร์เซลล์ (PV Power Response) แรงดันของโซลาร์เซลล์ (PV Voltage) และกระแสของโซลาร์เซลล์ (PV Current)

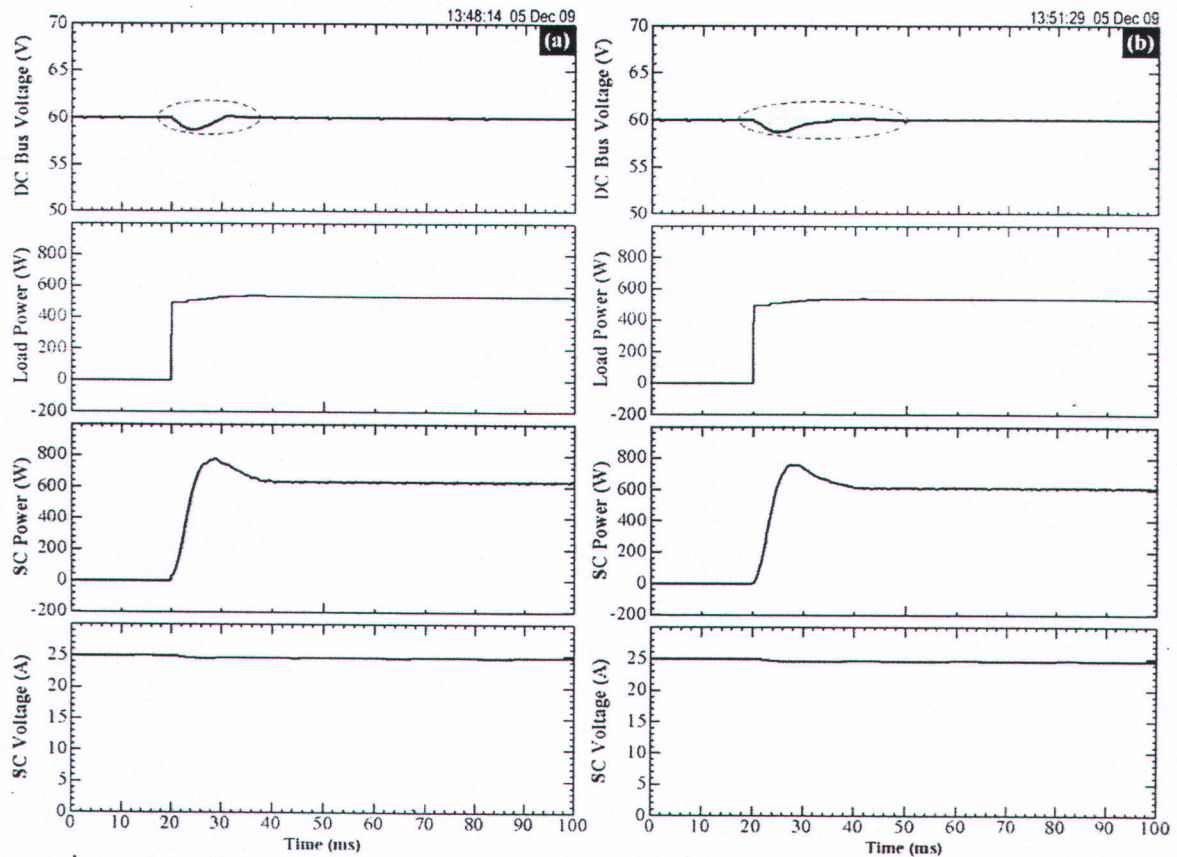


ภาพที่ 3-8 ไดนามิกส์ของระบบควบคุมกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ นำเสนอคำสั่งอ้างอิงของกำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Power Demand) กำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Power Response) แรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Voltage) และกระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Current)

เนื่องจากระบบควบคุมโดยวิธีการคำนวณแบบ flatness จะต้องมีการพารามิเตอร์ของระบบเข้ามาคำนวณด้วย ซึ่งระบบอาจจะไม่มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้ เพื่อยืนยันว่าวิธีการควบคุมแบบนี้ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของพารามิเตอร์ในระบบ (robustness) ระบบควบคุมถูกทดลองเปรียบเทียบดังนี้คือพารามิเตอร์ของระบบถูกตั้ง ($r_{FC} = 0.14 \Omega$, $r_{PV} = 0.12 \Omega$, $r_{SC} = 0.10 \Omega$) และพารามิเตอร์คลาดเคลื่อน ($r_{FC} = 0 \Omega$, $r_{PV} = 0 \Omega$, $r_{SC} = 0 \Omega$) ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบโมเดลถูกตั้งและโมเดลคลาดเคลื่อนแสดงดังภาพที่ 3-10 เป็นการทดลองขณะที่มีการสลับของโหลดขนาดใหญ่จาก 0 W ถึง 500 W แสดงสัญญาณแรงดันที่บัสไฟตรง (DC bus voltage) กำลังของโหลด (Load power) กำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC power) และแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC voltage) เพราะว่ากำลังจากเซลล์เชื้อเพลิงและโซลาร์เซลล์ช้ากว่ากำลังจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์มาก ดังนั้นซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะจ่ายกำลังไดนามิกส์ที่โหลดต้องการทั้งหมด เห็นได้ชัดว่าสัญญาณในภาพที่ 3-10(a) และ (b) จะไม่แตกต่างกันมากนัก แรงดันที่บัสไฟตรงจะมีผลกระทบมาจากการสลับของโหลดขนาดใหญ่ แต่ระบบควบคุมไม่มีผลกระทบมากนักจากพารามิเตอร์ในโมเดลคลาดเคลื่อน ดังนั้นทำให้สรุปได้ว่าระบบควบคุมแบบ flatness มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ (robustness)



ภาพที่ 3-9 การตอบสนองต่อการสับโหลดจาก 0 W ถึง 760 W ที่เวลา $t = 10$ ms หมายถึง $p_{\text{Load}} \approx p_{\text{SC}} + p_{\text{PV}}$ ($p_{\text{FC}} \approx 0$ ช่วงไดนามิกส์)



ภาพที่ 3-10 เปรียบเทียบไดนามิกการควบคุมแรงดันที่บัสไฟตรงของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมขณะที่มีการสลับของโหลดค่าสูง

- a). โมเดลถูกต้อง ($r_{FC} = 0.14 \, \Omega$, $r_{PV} = 0.12 \, \Omega$, $r_{SC} = 0.10 \, \Omega$)
 b). โมเดลคลาดเคลื่อน ($r_{FC} = 0 \, \Omega$, $r_{PV} = 0 \, \Omega$, $r_{SC} = 0 \, \Omega$)

3.3.3 รอบของโหลด (Load Cycle)

ภาพที่ 3-11 แสดงสัญญาณขณะจ่ายไฟให้กับโหลดรอบเดียว แสดงแรงดันที่บัสไฟตรง (dc bus voltage) (ซึ่งคือตัวแปรสแตตัสที่ 1 x_1 , นำเสนอแทนตัวแปรเอาต์พุต y_1) แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง (FC voltage) แรงดันของโซล่าเซลล์ (PV voltage) กำลังของโหลด (load power) กำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (supercapacitor power) (หรือตัวแปรอินพุต u_1) กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง (FC power) กำลังของโซล่าเซลล์ (PV power) กระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (supercapacitor current) กระแสของเซลล์เชื้อเพลิง (FC current) กระแสของโซล่าเซลล์ (PV current) และแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (supercapacitor voltage) (ซึ่งคือตัวแปรสแตตัสที่ 2 x_2 หรือนำเสนอสถานะการชาร์จของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (supercapacitor state-of-charge)) สถานะเริ่มต้นอยู่ในสถานะที่ไม่มีโหลดและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเต็มแล้ว ($v_{SC} = 25 \, \text{V}$) เป็นผลให้กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และซูเปอร์คาปาซิเตอร์เท่ากับศูนย์ ที่เวลา $t = 20 \, \text{s}$ โหลดขนาดใหญ่สลับจาก $0 \, \text{W}$ ไปยัง $840 \, \text{W}$ ขณะทำการทดลอง กำลังสูงสุดของโซล่าเซลล์ (ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมรับแสง สภาพอากาศและอุณหภูมิ) มีค่าเท่ากับประมาณ $200 \, \text{W}$ ถูกคำนวณโดยตัว MPPT และกำลังสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงถูกจำกัดไว้ที่ $360 \, \text{W}$ ดังนั้น กำลังของ

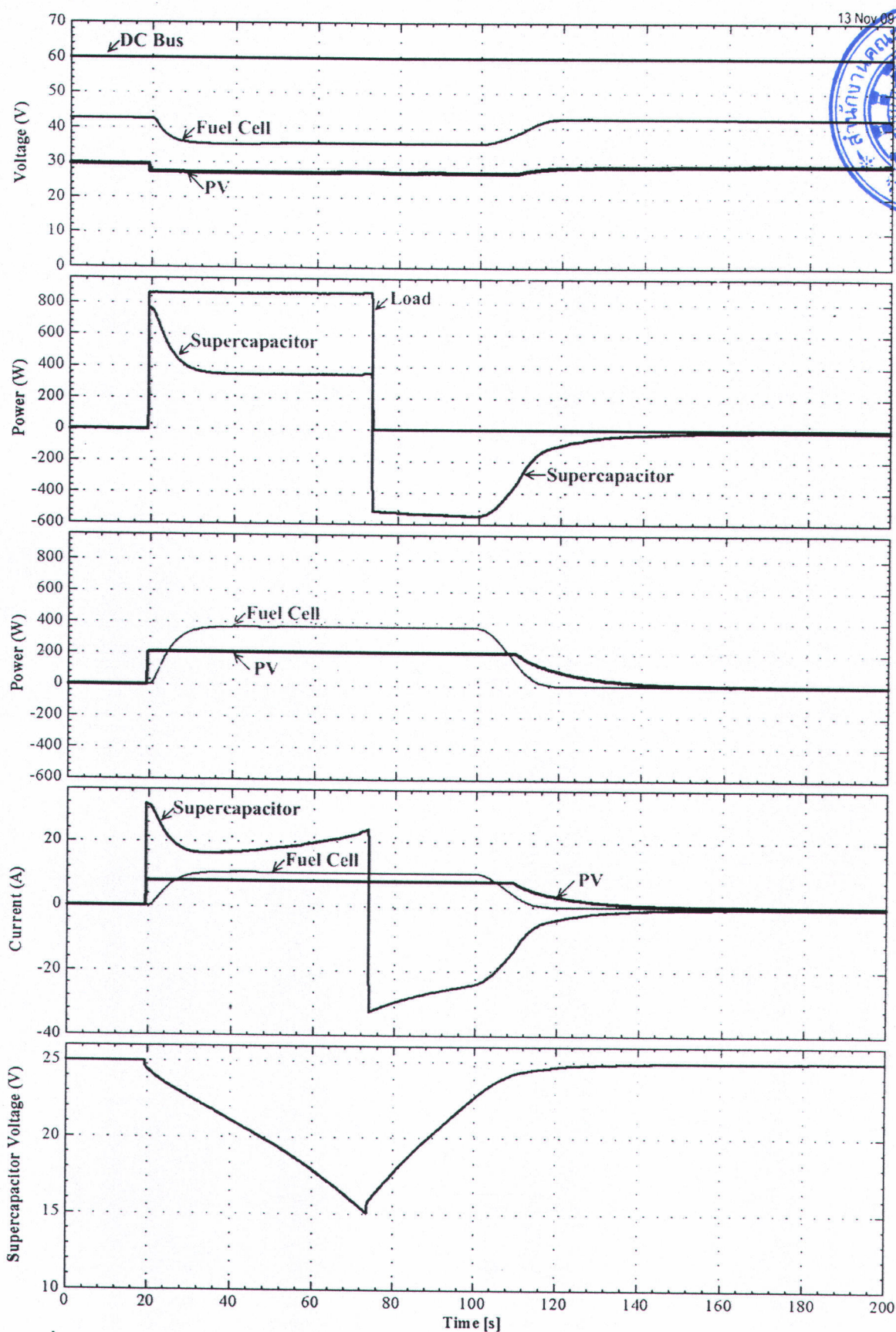
เซลล์เชื้อเพลิงไหลเพิ่มขึ้นพร้อมๆ กับการจำกัดความชันในลักษณะของตัวหน่วงลำดับที่ 2 (second order dynamics) ไปจนถึงกำลังสูงสุดที่จำกัดที่ 360 W ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์และโซล่าเซลล์จ่ายไฟทั้งหมดช่วงไดนามิกส์ขณะโหลดกระชาก ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์ยังคงอยู่ในสถานะคายประจุหลังจากโหลดสเทปเพราะโหลดที่สภาวะอยู่ตัว (840 W) มีค่าสูงกว่ากำลังสูงสุดรวมกันจากเซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์

หลังจากนั้นที่เวลา $t = 72$ s โหลดสเทปจาก 840 W ไปยัง 0 เป็นผลให้ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์เปลี่ยนสถานะจากคายประจุเป็นชาร์จประจุ มีปรากฏการณ์ 4 อย่างเกิดขึ้น

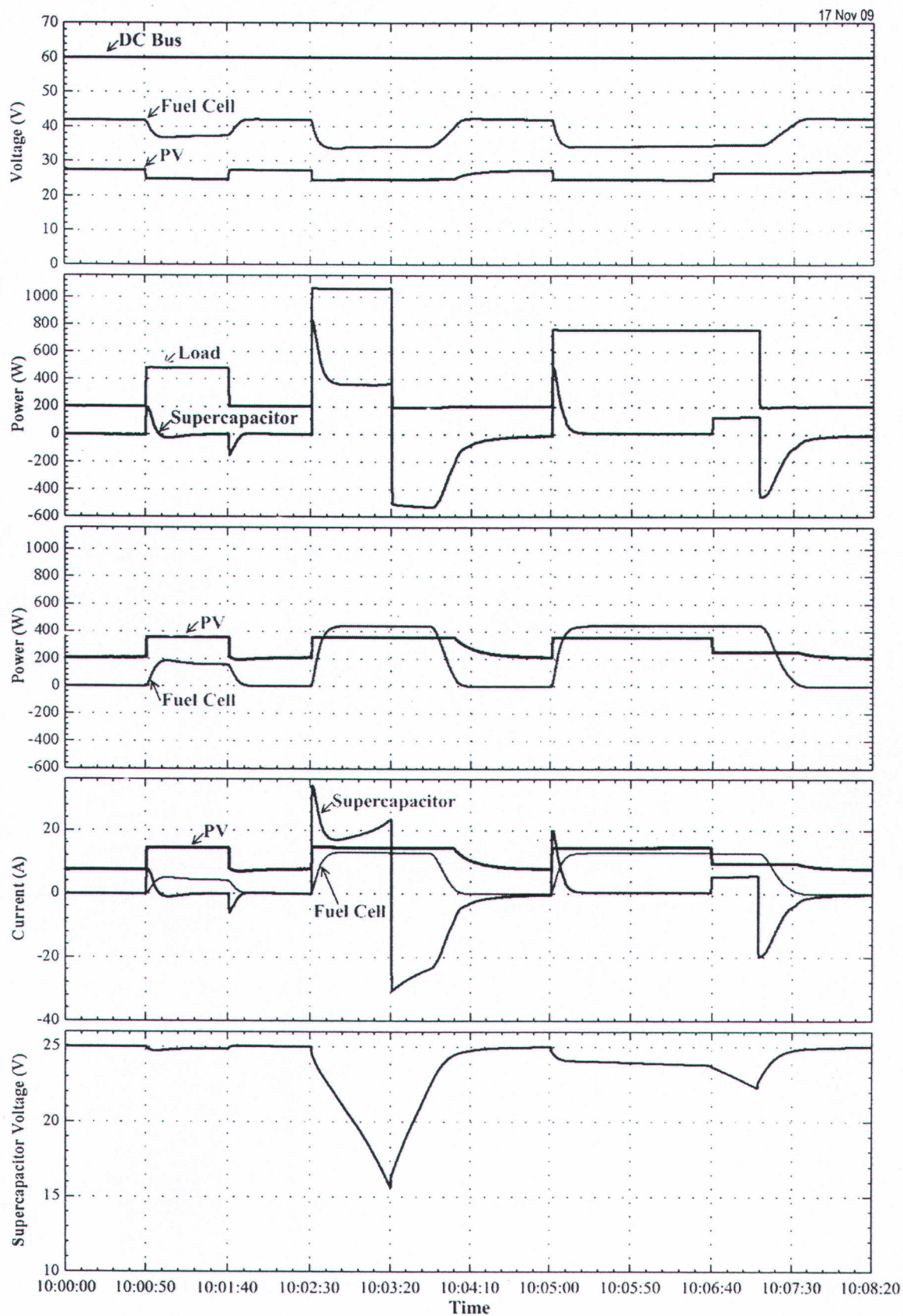
- ปรากฏการณ์แรก เซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์ยังคงจ่ายไฟที่กำลังสูงสุด เพื่อขับโหลดและชาร์จชุปเปอร์คาปาซิเตอร์
- ปรากฏการณ์ที่สอง ที่เวลา $t = 100$ s ($v_{sc} = 23$ V) ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเก็บประจุเกือบเต็ม ทำให้ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์ลดกำลังในการชาร์จประจุลง เป็นผลให้กำลังจากเซลล์เชื้อเพลิงลดลง
- ปรากฏการณ์ที่สาม ที่เวลา $t = 108$ s ($v_{sc} = 24.5$ V) ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเก็บประจุเกือบเต็มที่แล้ว เป็นผลให้กำลังจากเซลล์เชื้อเพลิงและโซล่าเซลล์ลดลง
- ปรากฏการณ์ที่สี่ ที่เวลา $t = 160$ s ชุปเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเต็ม เป็นผลให้กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง โซล่าเซลล์และชุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์

เห็นได้ชัดว่าสัญญาณแรงดันที่บัสไฟตรงมีเสถียรภาพตลอดรอบของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นจุดเด่นที่สำคัญที่มีชุปเปอร์คาปาซิเตอร์ช่วยให้สมรรถนะด้านไดนามิกส์ของทั้งระบบดีขึ้น

สุดท้าย ภาพที่ 3-12 แสดงสัญญาณขณะทดลองมีรอบของโหลดหลายรอบ สัญญาณก็จะคล้ายๆ กับภาพที่ 3-11 ขณะทำการทดลอง กำลังสูงสุดจากเซลล์เชื้อเพลิงถูกจำกัดที่ 440 W และกำลังจากโซล่าเซลล์ถูกจำกัดโดย MPPT ตัวอย่างเช่นที่เวลา 10:00:50 กำลังสูงสุดจากโซล่าเซลล์มีค่าประมาณ 360 W ที่เวลา 10:03:20 กำลังสูงสุดจากโซล่าเซลล์มีค่าประมาณ 360 W ที่เวลา 10:05:50 กำลังสูงสุดจากโซล่าเซลล์มีค่าประมาณ 360 W ที่เวลา 10:06:40 กำลังสูงสุดจากโซล่าเซลล์มีค่าลดลงจาก 360 W ไปยัง 240 W ชัดเจนมากที่แหล่งจ่ายไฟแบบผสมนี้มีการทำงานที่สมดุลย์ตลอดเวลา ($p_{Load}(t) \approx p_{FC}(t) + p_{PV}(t) + p_{sc}(t)$) ด้วยวิธีการควบคุมที่น่าเสนอ



ภาพที่ 3-11 การตอบสนองของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมต่อโหลดรอบเดียว



ภาพที่ 3-12 การตอบสนองของแหล่งจ่ายไฟแบบผสมต่อโหลดหลายรอบ