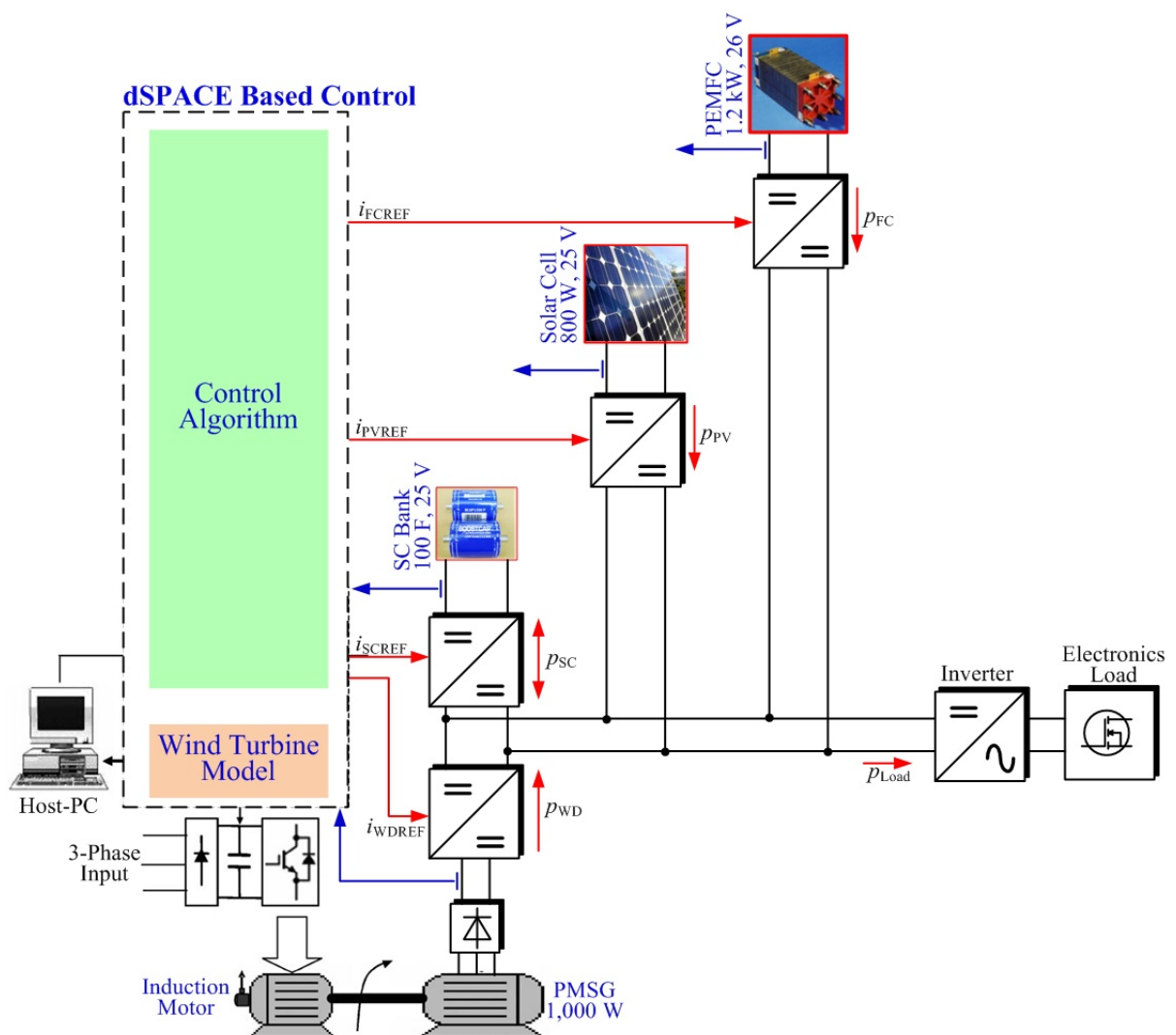


ภาพที่ 3-28 ถึงภาพที่ 3-32 แสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงสัญญาณดังนี้

- แรงดันที่บัสไฟตรง (V_{Bus}) แรงดันเซลล์เชื้อเพลิง (V_{FC}) แรงดันโซลาร์เซลล์ (V_{PV}) แรงดัน V_{WD}
- ความเร็วลม
- กำลังของโหลด (p_{Load}) กำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (p_{SC})
- กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง (p_{FC}) กำลังของโซลาร์เซลล์ (p_{PV}) กำลังของกังหันลม (p_{WD})
- กระแสของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SuperC Current) และ
- แรงดันซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SuperC Voltage)



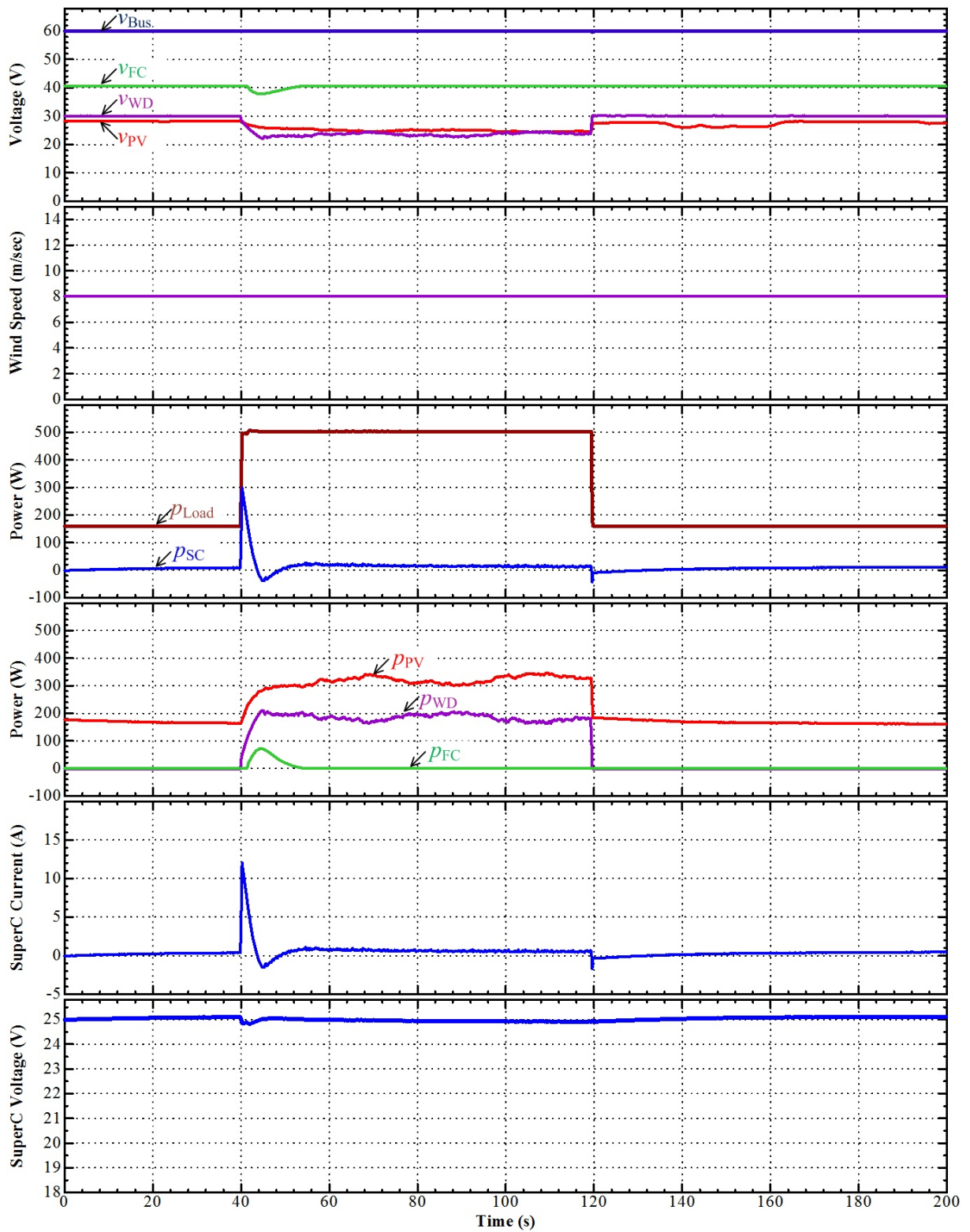
ภาพที่ 3-27 ไดอะแกรมการทดลองโรงไฟฟ้าต้นแบบขนาดเล็กจ่ายไฟโดยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานไฮโดรเจน พลังงานลมและแบตเตอรี่ชนิดซูเปอร์คาปาซิเตอร์

ในภาพที่ 3-28 สถานะเริ่มต้นอยู่ในสถานะมีโหลดเท่ากับ 150 W และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเต็มแล้ว ($v_{SC} = 25$ V) เป็นผลให้กำลังของโซลาร์เซลล์เท่ากับ 150 W เพื่อจ่ายไฟให้กับโหลด ขณะที่กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง กังหันลมและซูเปอร์คาปาซิเตอร์เท่ากับศูนย์ หมายความว่าขณะนี้แสงแดดมากพอที่จะจ่ายกำลัง 150 W ให้กับโหลด

ที่เวลา $t = 40$ s โหลดขนาดใหญ่สลับจาก 150 W ไปยัง 500 W ทำให้โซลาร์เซลล์ต้องจ่ายไฟเพิ่มขึ้น ขณะทำการทดลองกำลังสูงสุดของโซลาร์เซลล์ (ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมรับแสง สภาพอากาศ และอุณหภูมิ) มีค่าเท่ากับประมาณ 300 W ถูกคำนวณโดยตัว MPPTpv ผลต่างของกำลังของโหลดและกำลังของโซลาร์เซลล์ ทำให้กังหันลมต้องจ่ายไฟเพิ่มขึ้น ขณะทำการทดลองมีความเร็วลมที่คงที่ 8 m/s ทำให้กำลังของกังหันลมเพิ่มขึ้นจาก 0 W ไปยังประมาณ 200 W เนื่องจากการทำงานที่ล่าช้าของตัวคำนวณ MPPTpv และ MPPTwd ทำให้การจ่ายไฟของโซลาร์เซลล์และกังหันลมมีความเฉื่อยสูง สังเกตจากการหน่วงของสัญญาณกำลังไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์และของกังหันลม ทำให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ต้องคายประจุชดเชยกำลังที่ขาดไปช่วงไดนามิกส์ เช่นเดียวกันกำลังที่ขาดไประยะสั้นๆ นี้ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงช่วยโซลาร์เซลล์และกังหันลมจ่ายไฟ แต่ในสถานะอยู่ตัวหลังจากเวลา 60 s มีแต่โซลาร์เซลล์และกังหันลมจ่ายไฟให้กับโหลด หมายความว่าที่ความเร็วลม 8 m/s กังหันลมมีกำลังมากพอที่จะจ่ายไฟมากกว่า 200 W สังเกตกำลังของโซลาร์เซลล์จะไม่คงที่เนื่องมาจากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง ตัว MPPTpv จะคำนวณหาค่ากำลังสูงสุดตลอดเวลา เมื่อมุมรับแสง สภาพอากาศและอุณหภูมิเปลี่ยนทำให้กำลังของของโซลาร์เซลล์ก็เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงทำให้กำลังของกังหันลมเปลี่ยนแปลงด้วย

หลังจากนั้นที่เวลา $t = 120$ s โหลดสลับจาก 500 W กลับไปยัง 150 W เป็นผลให้โซลาร์เซลล์ลดการจ่ายกำลังลงเหลือ 150 W และกังหันลมลดกำลังลงเป็นศูนย์ กลับมาเหมือนเริ่มต้น

เห็นได้ชัดว่าสัญญาณแรงดันที่บัสไฟตรงมีเสถียรภาพตลอดรอบของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นจุดเด่นที่สำคัญที่มีซูเปอร์คาปาซิเตอร์ช่วยทำให้สมรรถนะด้านไดนามิกส์ของทั้งระบบดีขึ้น



ภาพที่ 3-28 ผลการทดลองจริง การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด

กรณีที่ 1: โหลดสลับจาก 150 W <--> 500 W

ในภาพที่ 3-29 สถานะเริ่มต้นอยู่ในสภาวะมีโหลดเท่ากับ 250 W และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเต็มแล้ว ($v_{SC} = 25$ V) และความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s แต่เนื่องจากขณะนี้กำลังของโซลาร์เซลล์ที่คำนวณจาก MPPTpv จ่ายได้แค่ประมาณ 80 W ทำให้กังหันลมต้องจ่ายกำลังช่วยประมาณ 170 W หมายความว่าที่ความเร็ว 8 m/s กังหันลมจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า 170 W ขณะที่กำลังของเซลล์เชื้อเพลิงและซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์หมายความว่าขณะนี้ไม่มีแสงแดดและความเร็วลมมากพอที่จะจ่ายกำลัง 250 W ให้กับโหลด

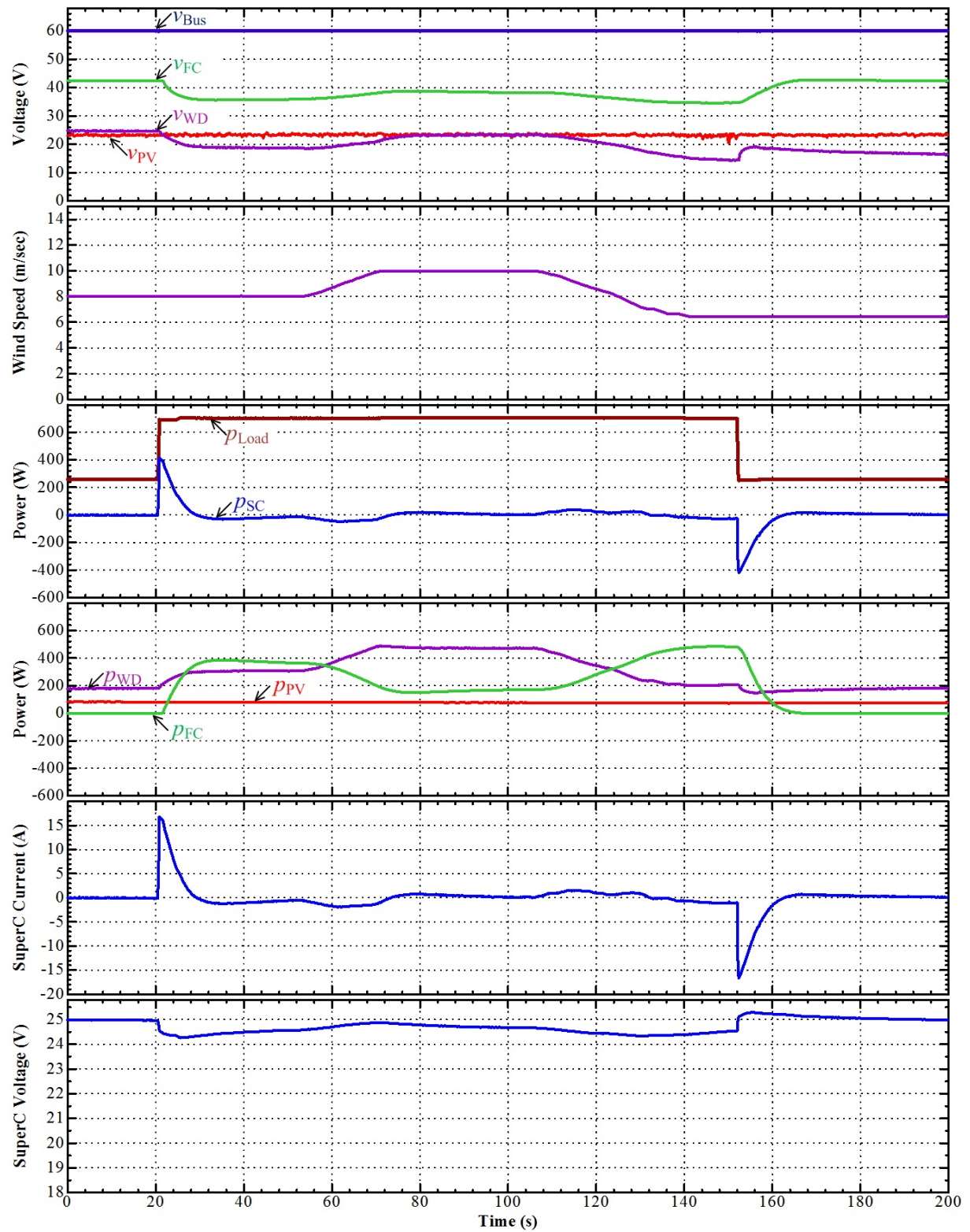
ที่เวลา $t = 20$ s โหลดขนาดใหญ่สุดปะจาก 250 W ไปยัง 700 W โซลาร์เซลล์ถูกจำกัดกำลังที่คงที่ 80 W ทำให้กังหันลมต้องจ่ายกำลังเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเร็ว 8 m/s กังหันลมจ่ายไฟได้แค่ 300 W คำนวณโดย MPPTwd เป็นผลทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟช่วยโซลาร์เซลล์และกังหันลม ที่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา $t = 40$ s เซลล์เชื้อเพลิงต้องจ่ายไฟประมาณ 380 W เนื่องจากความเฉื่อยที่สูงของเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ และกังหันลม ทำให้ช่วงไดนามิกส์ขณะสลับโหลดกำลังทั้งหมดถูกจ่ายโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์ เมื่อซูเปอร์คาปาซิเตอร์คายประจุออกไปทำให้แรงดัน v_{SC} ลดลง ทำให้เมื่อซูเปอร์คาปาซิเตอร์ช่วยจ่ายไฟช่วงไดนามิกส์ทำให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เปลี่ยนสถานะมาชาร์จประจุเริ่มตั้งแต่วเวลา $t = 28$ s ทำให้ขณะนี้แหล่งจ่ายหลักเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ และกังหันลมต้องจ่ายไฟให้กับโหลดและชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไปด้วย แต่เป็นการชาร์จที่กำลังต่ำๆ เพราะแรงดัน v_{SC} มีค่าใกล้เคียง 25 V

ที่เวลา $t = 54$ s ความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 8 m/s ไปเรื่อยๆ จนถึง 10 m/s ที่เวลา $t = 70$ s เป็นผลให้กังหันลมสามารถสร้างกำลังได้เพิ่มขึ้น สังเกตจากเวลา $t = 54$ s ถึง $t = 70$ s กังหันลมจ่ายไฟเพิ่มจาก 300 W ไปยัง 480 W เป็นผลทำให้เซลล์เชื้อเพลิงลดการจ่ายไฟลง

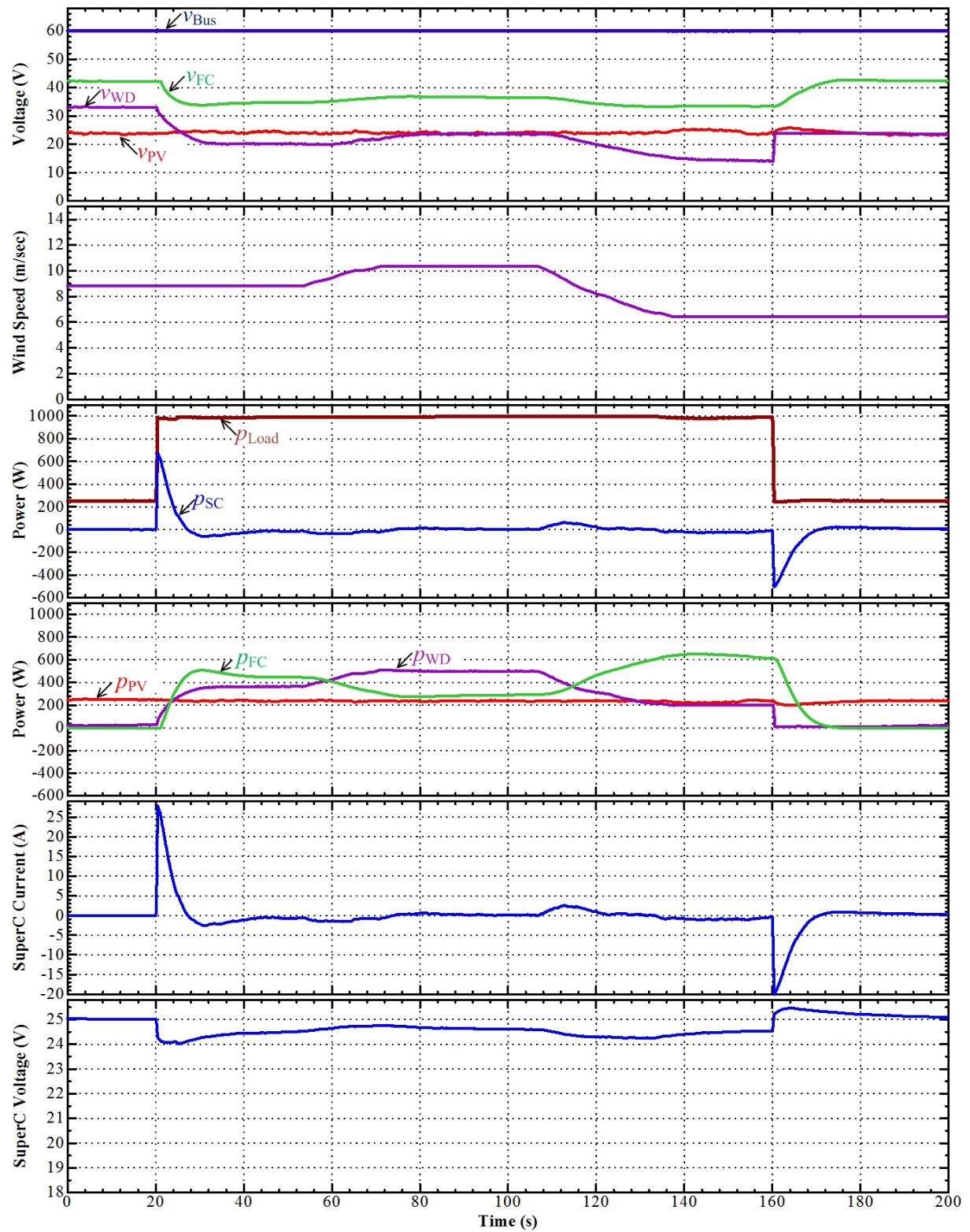
หลังจากนั้นที่เวลา $t = 108$ s ความเร็วลมลดลงจาก 10 m/s ไปเรื่อยๆ จนถึง 6.2 m/s ที่เวลา $t = 140$ s เป็นผลให้กังหันลมลดการจ่ายกำลังลง สังเกตจากเวลา $t = 108$ s ถึง $t = 140$ s กังหันลมจ่ายไฟลดลงจาก 480 W ไปยัง 200 W เป็นผลทำให้เซลล์เชื้อเพลิงต้องจ่ายไฟเพิ่มขึ้น

สุดท้ายที่เวลา $t = 152$ s โหลดสลับจาก 700 W กลับไปยัง 250 W เป็นผลให้กังหันลมลดการจ่ายกำลังลงเหลือ 170 W เพื่อช่วยโซลาร์เซลล์จ่ายไฟให้กับโหลด ขณะที่ความเฉื่อยที่มีค่าสูงของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงค่อยลดการจ่ายกำลังลงมาที่ศูนย์ ทำให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ต้องชาร์จไฟเพื่อรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินที่มาจากเซลล์เชื้อเพลิงนี้

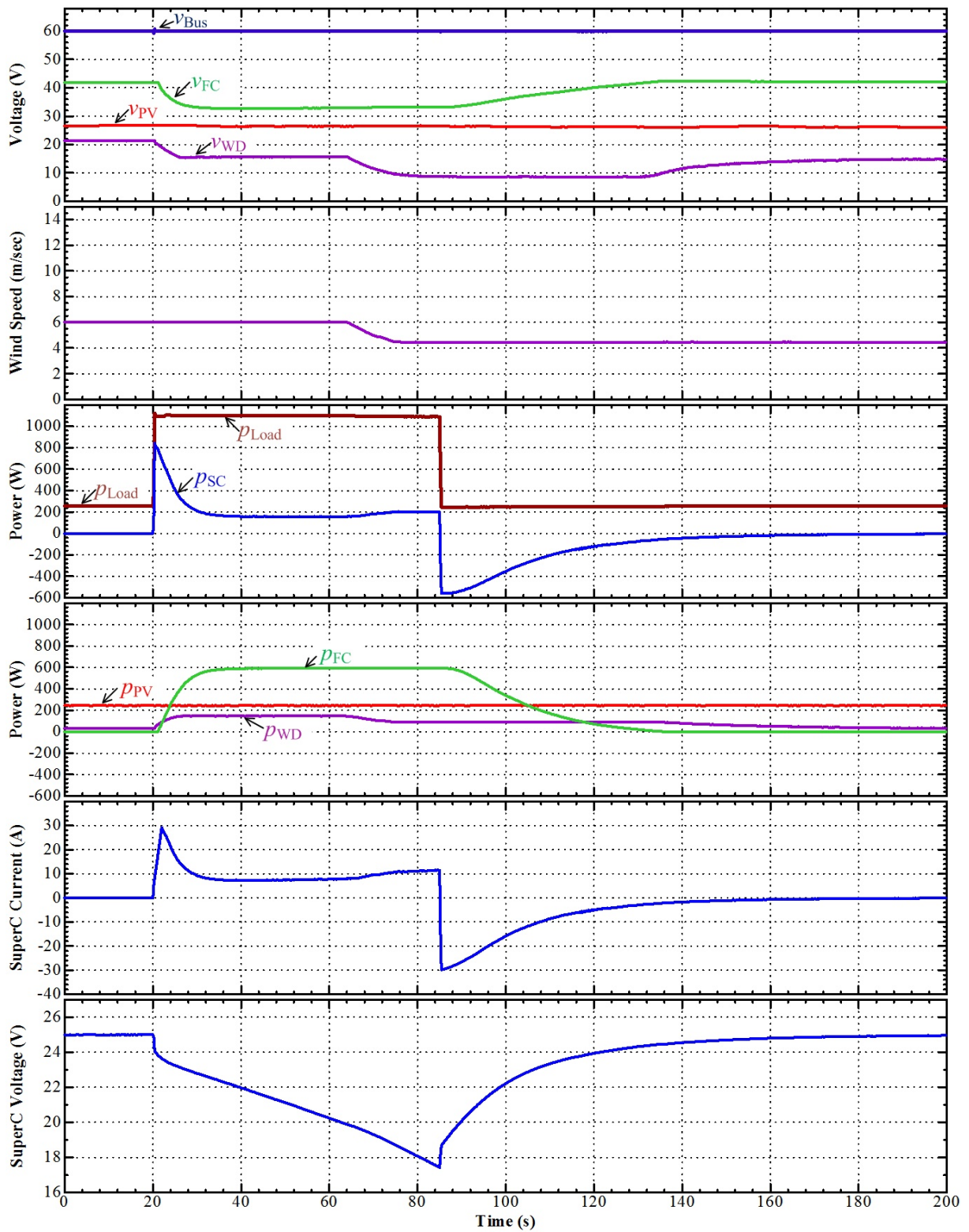
เห็นได้ชัดว่าสัญญาณแรงดันที่บัสไฟตรงมีเสถียรภาพตลอดรอบของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นจุดเด่นที่สำคัญที่มีซูเปอร์คาปาซิเตอร์ช่วยทำให้สมรรถนะด้านไดนามิกส์ของทั้งระบบดีขึ้น



ภาพที่ 3-29 ผลการทดลองจริง การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด
กรณีที่ 2: โหลดสลับจาก 250 W <--> 700 W

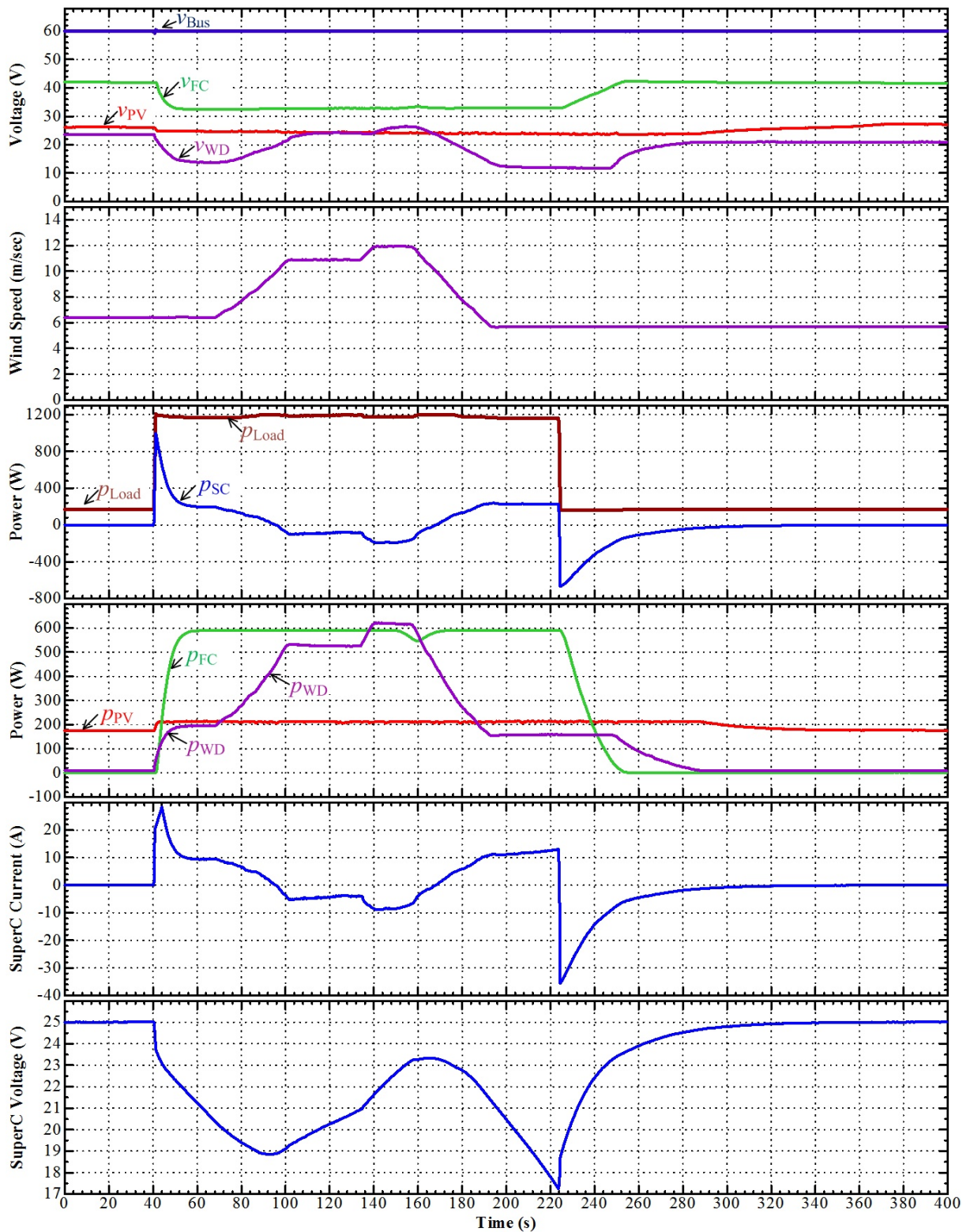


ภาพที่ 3-30 ผลการทดลองจริง การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด
กรณีที่ 3: โหลดสลับจาก 250 W <--> 1,000 W



ภาพที่ 3-31 ผลการทดลองจริง การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด

กรณีที่ 4: โหลดสลับจาก 250 W $\leftrightarrow$ 1,100 W



ภาพที่ 3-32 ผลการทดลองจริง การตอบสนองของโรงไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด
กรณีที่ 5: โหลดสลับจาก 150 W <--> 1,200 W

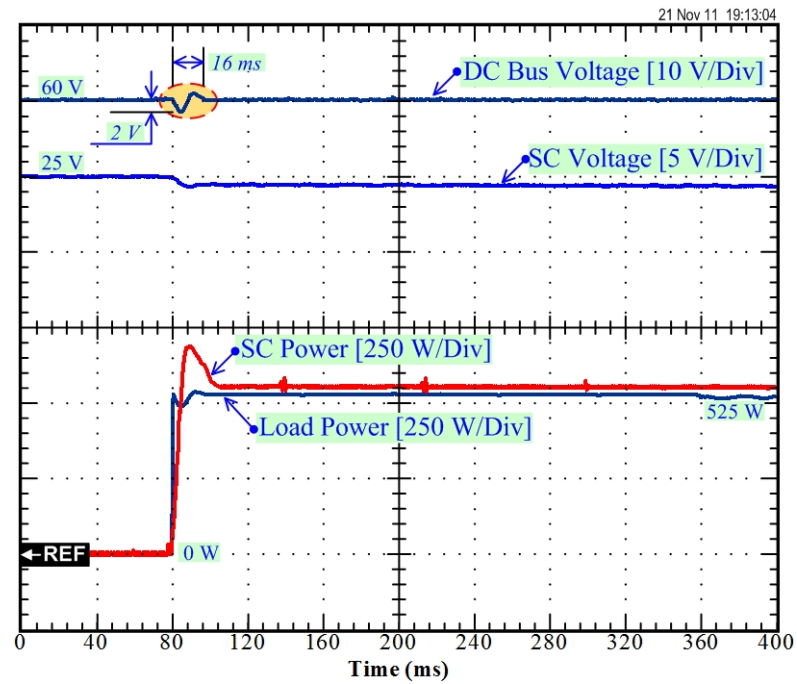
ขณะที่ภาพที่ 3-30 ถึงภาพที่ 3-32 เป็นการทดลองที่เงื่อนไขอื่นๆ แต่สังเกตได้ว่าระบบจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพทำให้ระบบสมดุลตลอดเวลา แรงดันที่บัสไฟตรงจะถูกควบคุมให้คงที่ตลอดเวลานั้นคือ $p_{\text{Load}}(t) \approx p_{\text{FC}}(t) + p_{\text{PV}}(t) + p_{\text{WD}}(t) + p_{\text{SC}}(t)$

เพื่อศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้างัดนามิกส์ขณะสแตปโหลด ภาพที่ 3-33 แสดงสัญญาณขณะมีการสแตปโหลดขนาดใหญ่

โดยที่จ้อออสซิลโลสโคปแสดงสัญญาณ

- แรงดันที่บัสไฟตรง (DC Bus Voltage)
- แรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Voltage)
- กำลังของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC Power) และ
- กำลังของโหลด (Load Power)

เริ่มต้นขณะที่ไม่มีโหลด ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกชาร์จเต็มแล้ว (นั่นคือ $v_{\text{SCREF}} = 25 \text{ V}$) และบัสไฟตรงถูกควบคุมให้คงที่ที่ 60 V ($v_{\text{BusREF}} = 60 \text{ V}$) เป็นผลทำให้กำลังของเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ ที่เวลา $t = 80 \text{ s}$ โหลดสแตปจาก 0 W - 525 W เป็นผลให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์จ่ายกำลังช่วงไดนามิกส์ทั้งหมด ผลการทดลองแสดงให้เห็นการตอบสนองทางไดนามิกส์ต่อการสแตปโหลดขนาดใหญ่เป็นไปตามสมการที่ (2-47) ซึ่งเป็นไปตามลักษณะสมบัติของสมการห้วงลำดับที่ 2 การแกว่งเล็กน้อยของบัสไฟตรงเพราะว่าอัตราขยาย K_{12} มีค่าสูงและโหลดมีค่าสูงมาก ค่าอัตราขยาย K_{12} สามารถลดลงได้เพื่อลดการแกว่ง อย่างไรก็ตาม มันจะทำให้การตอบสนองช้าลง กฎการควบคุม (control law) แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพและการตอบสนองที่ดีที่สุดเพื่อควบคุมแรงดันที่บัสไฟตรงที่ 60 V ถึงแม้ว่าไดนามิกส์ของระบบควบคุมสามารถทำให้ดีขึ้นได้แต่ระบบอาจจะเข้าไปใกล้ขอบของการไม่มีเสถียรภาพได้ (reduced stability margin)



ภาพที่ 3-33 การตอบสนองของแรงดันที่บัสไฟตรงต่อการสแตบิลไลซ์ (stabilization) จาก 0 W ถึง 525 W ที่เวลา $t = 80$ ms หมายเหตุ $p_{\text{Load}} \approx p_{\text{SC}}$ ($p_{\text{FC}} \approx p_{\text{PV}} \approx p_{\text{WD}} \approx 0$ ช่วงไดนามิกส์)



จุดเด่นหลักของงานวิจัยนี้คือนำเสนอการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนต้นแบบจ่ายไฟโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่รีซินิคซูเปอร์คาปาซิเตอร์ งานวิจัยนำเสนอการคำนวณโมเดลและการควบคุมโรงไฟฟ้า โรงไฟฟ้าต้นแบบที่ทำการศึกษประกอบด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC (ขนาด 1200 W เรียกว่า Nexa Ballard FC power system) แผงโซลาร์เซลล์ (ขนาด 800 W ของบริษัท เอกรัฐโซลาร์ จำกัด) กังหันลมขนาด 1 kW และโมดูลของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (100 F, 32 V ของบริษัท Maxwell Technologies) วงจรแปลงไฟแบบทบทรงดันขนานกันสัต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง วงจรแปลงไฟแบบทบทรงดันขนานกันสัต์สำหรับโซลาร์เซลล์ วงจรแปลงไฟแบบทบทรงดันขนานกันสัต์สำหรับกังหันลมรวมทั้งวงจรเรียงกระแส วงจรแปลงไฟแบบสองทิศทางขนานกันสัต์สำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์และอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส ซึ่งเป็นต้นแบบสำหรับงานกำลังสูง หลักการทำงาน การวิเคราะห์และการออกแบบแต่ละขั้นตอนได้นำเสนอ

โซลาร์เซลล์และกังหันลมจะทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟหลัก ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงจะช่วยจ่ายไฟเพื่อชดเชยบางสถานการณ์ที่โซลาร์เซลล์และกังหันลมไม่สามารถจ่ายไฟได้ในสถานะอยู่ตัว ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานสำรองหรือแหล่งจ่ายไฟสำรอง ช่วยจ่ายไฟเมื่อเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์และกังหันลมไม่สามารถจ่ายไฟทั้งในสถานะอยู่ตัวและไดนามิกส์

ด้วยวิธีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นแบบ flatness งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาอย่างง่ายสำหรับปัญหาด้านไดนามิกส์ เสถียรภาพและความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแนวคิดต้นแบบสำหรับการประยุกต์ใช้งานในลักษณะนี้

ชุดทดลองด้านฮาร์ดแวร์ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นจริงในห้องทดลอง เพื่อพิสูจน์ยืนยันวิธีการควบคุมและกฎการควบคุม ผลการทดลองพิสูจน์ให้เห็นว่าระบบทำงานได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม กฎการควบคุมที่นำเสนอมีความจำเป็นต้องวัดกระแสของโหลด เพื่อคำนวณกำลังของโหลด งานในอนาคต ระบบจะต้องมีตัวสังเกตการณ์ของโหลด (load observer) เพื่อหลีกเลี่ยงการวัดกระแสของโหลดนี้ อีกทั้งวงจรแปลงไฟที่มีอัตราขยายแรงดันต่ำ งานในอนาคต วงจรแปลงไฟควรเป็นวงจรที่มีอัตราขยายสูงขึ้นเช่น Full Bridge Converter



- [1] P. Thounthong, B. Davat, and S. Raël, “Drive friendly,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 69–76, Jan./Feb. 2008.
- [2] M. W. Ellis, M. R. Von Spakovsky, and D. J. Nelson, “Fuel cell systems: Efficient, flexible energy conversion for the 21st century,” *Proc. IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1808–1818, Dec. 2001.
- [3] W. Friede, S. Raël, and B. Davat, “Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1234–1241, Sept. 2004.
- [4] P. Thounthong, B. Davat, S. Raël, and P. Sethakul, “Fuel cell high power applications,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 32–46, Mar. 2009.
- [5] M. Hinaje, I. Sadli, J.-P. Martin, P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, “Online humidification diagnosis of a PEMFC using a static dc-dc converter,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 2718–2723, Mar. 2009.
- [6] I. Sadli, P. Thounthong, J.-P. Martin, S. Raël, and B. Davat, “Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter,” *J. Power Sources*, vol. 156, no. 1, pp. 119–125, May 2006.
- [7] The IEA Photovoltaic Power Systems Programme, “Trends in photovoltaic applications,” Survey report 2008.
- [8] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, “Optimal Control of Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 787–794, Sept. 2010.
- [9] S. M. Mueeen, R. Takahashi, T. Murata, and J. Tamura, “Integration of an Energy Capacitor System With a Variable-Speed Wind Generator,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 3, pp. 740–749, Sept. 2009.
- [10] R. M. Nelms, D. R. Cahela, and B. J. Tatarchuk, “Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 39, no. 2, pp. 430–438, Apr. 2003.
- [11] P. Thounthong and S. Raël, “The Benefits of hybridization,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, no. 3, pp. 25–37, Sept. 2009.
- [12] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, “Analysis of supercapacitor as second source based on fuel cell power generation,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 247–255, Mar. 2009.
- [13] J. R. Miller and D. A. Evans, “Performance characteristics of high reliability double layer capacitor components,” in *Proc. 35th IEEE Int. Power Sources Symp.*, Cherry Hill, NJ, Jan. 22–25, 1992, pp. 302–305.
- [14] D. J. Perreault and J. G. Kassakian, “Distributed Interleaving of Paralleled Power Converters,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 44, no. 8, pp. 728–734, Aug. 1997.
- [15] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, “Signal flow graph nonlinear modelling of interleaved Converters,” *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 148, no. 5, pp. 410–418, Sep. 2001.

- [16] H. B. Shin, J. G. Park, S. K. Chung, H. W. Lee, and T.A. Lipo, "Generalised steady-state analysis of multiphase interleaved boost converter with coupled inductors," *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 152, no. 3, pp. 584–594, May 2005.
- [17] M. Baumann, and J. W. Kolar, "Parallel connection of two three-phase three-switch buck-type unity-power-factor rectifier systems with DC-link current balancing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3042–3053, Dec. 2007.
- [18] M. Fliess, J. Lévine, Ph. Martin, and P. Rouchon, "Flatness and defect of nonlinear systems: Introductory theory and examples," *Int. J. Contr.*, vol. 61, no. 6, pp. 1327–1361, 1995.
- [19] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, "A lie–bäcklund approach to equivalence and flatness of nonlinear systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 44, no. 5, pp. 922–937, May 1999.
- [20] V. Morio, F. Cazaurang, and P. Vernis, "Flatness-based hypersonic reentry guidance of a lifting-body vehicle," *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 5, pp. 588–596, May 2009.
- [21] P. Thounthong and B. Davat, "Study of a multiphase interleaved step-up converter for fuel cell high power applications," *Energy Convers. Manage.*, vol. 51, no. 1, pp. 826–832, April 2010.
- [22] C. P. Mudannayake and M. F. Rahman, "Future automotive 42-V powernet application," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 14–25, July-Aug. 2009.
- [23] E. Song, A. F. Lynch, and V. Dinavahi. "Experimental validation of nonlinear control for a voltage source converter," *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 1135–1144, Sept. 2009.
- [24] A. Gensior, H. Sira-Ramirez, J. Rudolph, H. Guldner, "On some nonlinear current controllers for three-phase boost rectifiers," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 2, pp. 360–370, Feb. 2009.
- [25] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3225–3233, Dec. 2007.
- [26] L. R. Chen, C. H. Tsai, Y. L. Lin, and Y. S. Lai, "A biological swarm chasing algorithm for tracking the PV maximum power point," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 484–493, June 2010.
- [27] T. L. Gibson, N. A. Kelly, "Solar photovoltaic charging of lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 12, pp. 3928–3932, June 2010.
- [28] O. Lopez, F. D. Freijedo, A. G. Yepes, P. F. Comesana, J. Malvar, R. Teodorescu, and J. Doval-Gandoy, "Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 1, pp. 140–147, Mar. 2010.
- [29] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, and M. Hinaje, "Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3892–3904, Oct. 2009.
- [30] P. Thounthong, B. Davat, S. Raël, and P. Sethakul, "Fuel starvation: Analysis of a PEM fuel cell system," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 52–59, Jul./Aug. 2009.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว. 2553

1). ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (The Thailand Research Fund (TRF) under Grant TRF: MRG5380261)

- 1.1 **P. Thounthong**, “Model Based-Energy Control of a Solar Power Plant With a Supercapacitor for Grid-Independent Applications,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1210–1218, Dec. 2011. (2010 Impact Factor: 2.260) (See page 90)
- 1.2 **P. Thounthong**, “A New Control Law Based on the Differential Flatness Principle for Multiphase Interleaved DC–DC Converter,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 57, no. 11, pp. 903–907, Nov. 2010. (2010 Impact Factor: 1.334) (See page 99)

2). การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

พัฒนาการเรียนการสอน ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ ใช้ประกอบการเรียนการสอน

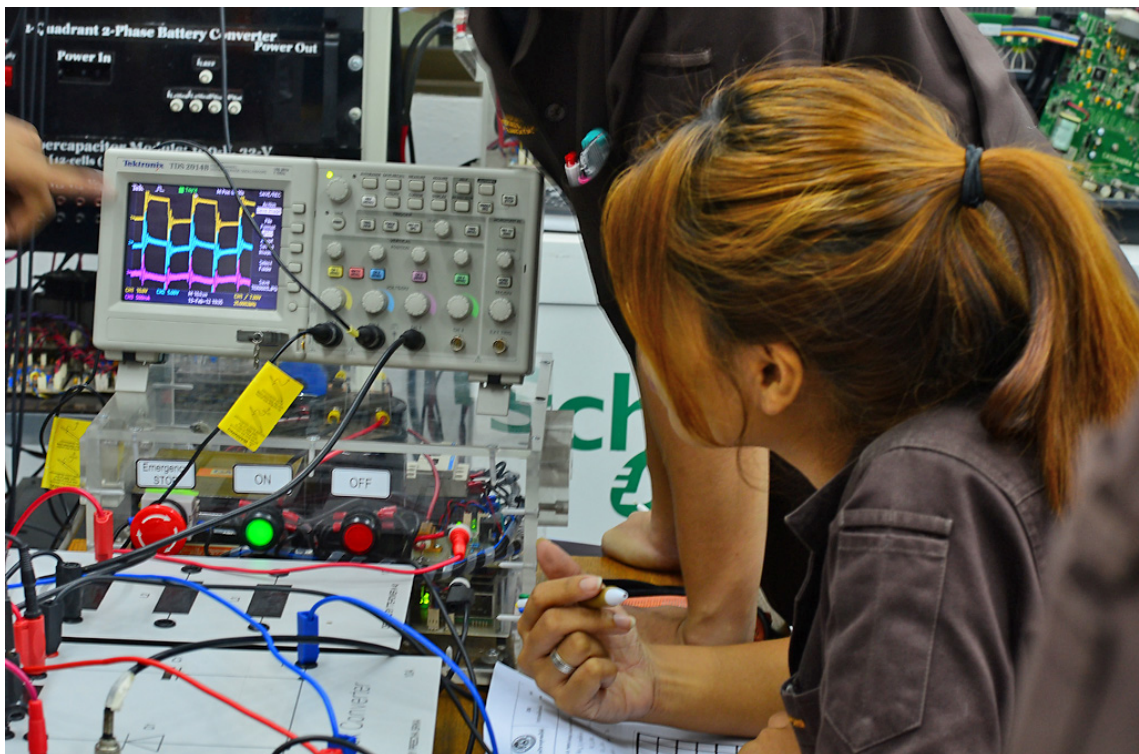
ระดับปริญญาโท วิชา Power Electronics Design รหัสวิชา: 225434

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ระดับ ปริญญาตรี วิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) รหัสวิชา: 223304
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



สร้างนักวิจัยใหม่ 2 คนคือนายสุวัจน์ สิกบุตรและนายพงษ์ศิริ มุ่งพร
ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3). การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ IEEE

- 3.1 P. Thounthong, S. Sikkabut, P. Sethakul, B. Davat, “Differential Flatness Based-Control of Wind Generator/Supercapacitor Power Plant,” in *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, ROME-Italy, 8-11 May 2011, pp. 1-4 (CD-ROM).
- 3.2 P. Thounthong, S. Sikkabut, P. Sethakul, B. Davat, “Model Based-Control of Three-Level Boost Converter for Fuel Cell Applications,” in *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, ROME-Italy, 8-11 May 2011, pp. 1-4 (CD-ROM).
- 3.3 A. Luksanasakul, P. Koseeyaporn, P. Sethakul, B. Davat, and P. Thounthong, “Fuzzy Control Law Based-on Flatness Property for a DC Link Stabilization for a Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Power Plant,” in *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER (ICCEP)*, Ischia – Italy, 14-16 June 2011, pp. 73-80.

4). นักวิจัยที่สำเร็จการศึกษา

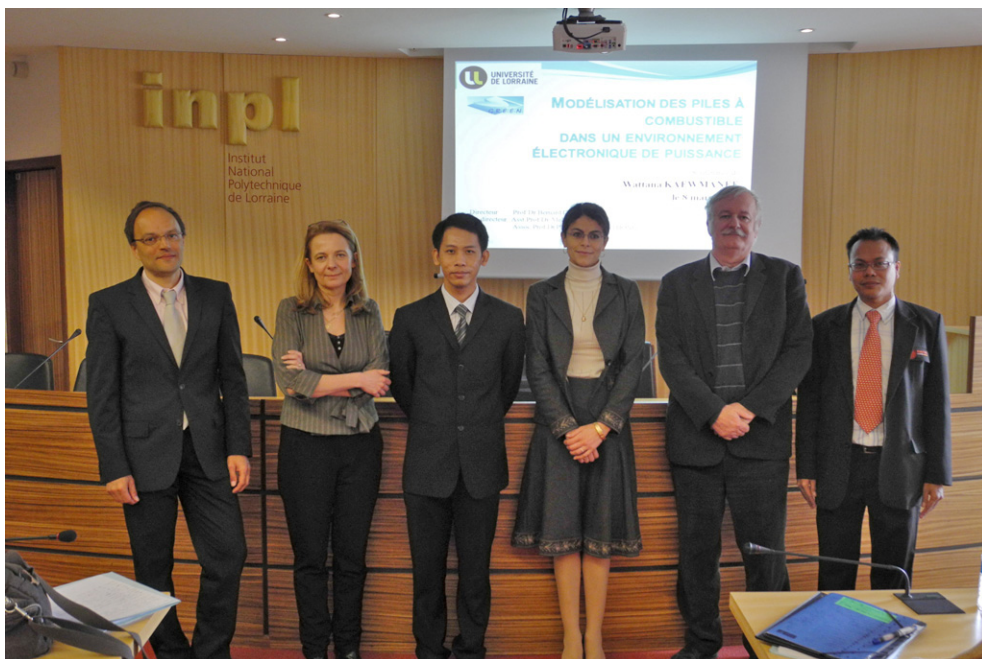
ระดับปริญญาเอกจำนวน 1 คน

นายวัฒนา แก้วมณี

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

University: Université de Lorraine, Nancy, France

หมายเหตุ เป็นที่ปรึกษาร่วม Co-director



ระดับปริญญาโทจำนวน 1 คน

นายณพดล หนัวินัน

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง “การควบคุมแหล่งจ่ายไฟตรงแบบผสมด้วยเซลล์แสงอาทิตย์และซูเปอร์คาปาซิเตอร์”

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หมายเหตุ เป็นที่ปรึกษาร่วม



Model Based-Energy Control of a Solar Power Plant With a Supercapacitor for Grid-Independent Applications

Phatiphat Thounthong, *Member, IEEE*

Abstract—This paper proposes a design for a renewable-energy hybrid power plant that is fed by a photovoltaic (PV) source with a supercapacitor (SC) storage device and is suitable for distributed generation applications. The PV array is used as the main generator, and the SC functions as an auxiliary source for supplying the (transient and steady-state) power deficiency of the PV array. For high-power applications, four-phase parallel boost converters and four-phase parallel bidirectional converters are implemented as a PV converter and a storage device, respectively. A reduced-order mathematical model of the PV and SC converters is described for the control of the power plant. Using a nonlinear approach based on the flatness property, we propose a simple solution to the dynamic, stabilization, and robustness problems in the hybrid power system. This is the key innovative contribution of this research paper. We analyze a prototype small-scale power plant composed of a 0.8-kW PV array and a 100-F SC module. The experimental results authenticate the excellent control algorithm during load cycles.

Index Terms—Converters, flatness, hybrid source, nonlinear control, photovoltaic (PV), supercapacitor (SC).

I. INTRODUCTION

CURRENTLY, renewable energy is receiving greater attention as a sustainable alternative to more traditional energy sources. One of these environmentally friendly energy sources is solar energy; however, there are still some severe concerns about several sources of renewable energy and their implementation, e.g., 1) capital costs and 2) their intermittent power production, called the “intermittency problem.” The intermittency problem of solar energy is that solar panels cannot produce power steadily because their power production rates change with seasons, months, days, hours, etc. If there is no sunlight, no electricity will be produced from the photovoltaic (PV) cell.

To overcome the intermittency problem, a storage medium or electrical energy carrier [a battery or a supercapacitor (SC)]

is needed. An SC storage device is preferable due to its high power density, fast energy sourcing, and long lifetime [1]. In the near future, the utility power system will be supplied on a large scale by solar energy sources and storage device(s) in a *hybrid energy system* to increase the reliability and effectiveness of the individual components [2].

The dynamics, robustness, and stability of the operation of hybrid power plants are of particular interest. In this work, a hybrid power generation system is proposed and it consists of the following main components: a PV source and an SC as a high-power density device. The most popular way to control power converters in the industry today is with a linear control structure [3], [4]. The design of the linear proportional-integral (PI) controller usually proceeds by incorporating the switching mode controller into the plant (converter). Later averaging and linearization enables the employ of the Laplace transform [5], [6]. The PI controller may then be designed for a certain phase margin, normally around 30–60°. Because the switching model of the hybrid power plant (power electronic converters) is nonlinear, it is natural to apply model-based nonlinear control strategies that directly compensate for system nonlinearity without requiring a linear approximation [7].

Currently, many modeling and linear or nonlinear control aspects, including classical state-space or transfer approaches [8], [9], self-tuning methods or sliding mode control [10], the exact linearization technique [11], adaptive control [12], or fuzzy logic-based control [13], have been extensively studied for nonlinear power electronic applications. Flatness-based control has recently been studied in many applications because it is appropriate for robustness, predictive control, trajectory planning, and constraint handling. Based on the flatness approach, the state feedback can be chosen in such a way that the closed-loop dynamic behavior is linear [14]. Flat systems are linearizable in the quasi-static state feedback. When used for tracking, quasi-static state feedback is very useful.

The flatness theory was introduced by Fliess *et al.* [14] in 1995. Recently, these ideas have been used in a variety of nonlinear systems across the various engineering disciplines, including the following applications: the control of an inverted pendulum and a vertical take-off and landing aircraft [15]; the process of a stirred tank chemical reactor [16]; the control of vehicle steering [17]; the control of a high-speed linear axis driven by pneumatic muscle actuators [18]; the control of cathode pressure and the oxygen excess ratio of a proton exchange membrane (PEM) fuel cell system [19]; the steering control of a two-level quantum system [20]; the reactive power and the

Manuscript received March 24, 2011; revised July 6, 2011; accepted September 6, 2011. Date of publication October 10, 2011; date of current version November 23, 2011. This work was supported in part by the research program in cooperation with the Thai–French Innovation Institute, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok with the Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy University, under the “Franco-Thai on Higher Education and Research Joint Project year: 2009–2010,” and in part by the Thailand Research Fund under Grant MRG5380261. Paper no. TEC-00153-2011.

The author is with the Department of Teacher Training in Electrical Engineering (TE), King Mongkut’s University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Bangkok 10800, Thailand (e-mail: phatiphat.thounthong@ensem.inpl-nancy.fr).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TEC.2011.2168400

0885-8969/\$26.00 © 2011 IEEE