

การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี
สำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิจ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**AVERAGE CURRENT ESTIMATIONS OF PV PANEL
FOR GRID-CONNECTED INVERTER**



Narongdech Dungkratoke

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกริด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.สุदारัตน์ ขวัญชอน)

ประธานกรรมการ



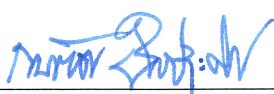
(อ. ดร.วิโรจน์ แสงชงทอง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ

พัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณรงค์เดช คิงกระโทก : การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีสำหรับอินเวอร์เตอร์
เชื่อมต่อกกริด (AVERAGE CURRENT ESTIMATIONS OF PV PANEL FOR GRID-
CONNECTED INVERTER) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.วิโรจน์ แสงรงทอง, 155 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวีที่เชื่อมต่อกับ
ตัวเก็บประจุและด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มเต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดียว
อินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีด้านเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับตัวเหนี่ยวนำและกริดเอซี หน่วยประมาณค่า
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยตรง หรือตัวสังเกตสถานะโหมดการ
เลื่อนอันดับหนึ่งหรืออันดับสองจะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวี และหน่วยคำนวณ
ค่าเฉลี่ยจะคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง ระบบควบคุมวงปิดประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์
พีวีชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แผงพีวีที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับกริดกับ
กริดเอซี หน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม เซนเซอร์วัดแรงดันกริด เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด เซนเซอร์วัด
แรงดันตกคร่อมแผงพีวี ตัวควบคุมแรงดันดีซีของแผงพีวี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด เฟสล็อกกลูป
เอ็มพีพีที และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยหรือตัวสังเกตสถานะที่แทนที่การใช้งาน
เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เฟสล็อกกลูปได้รับแรงดันกริดเอซีและประมาณค่าไซน์ของ
ตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริด เอ็มพีพีทีได้รับแรงดันเฉลี่ยของแผงพีวีและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของ
แผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่า ผลคูณระหว่างแรงดันเฉลี่ยและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคือกำลังงานเฉลี่ย
ที่ผลิตได้จากแผงพีวี และเอ็มพีพีทีใช้ความชันของเส้นกราฟระหว่างกำลังงานเฉลี่ยและแรงดันเฉลี่ย
นำมาเพิ่มหรือลดแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี หน่วยพีดับเบิลยูเอ็มนำแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของ
อินเวอร์เตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง และสร้างสัญญาณขับเกตของ
ไอจีบีที 4 ตัวที่อยู่ในอินเวอร์เตอร์ ระบบควบคุมวงปิดมีลูปลควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่เป็นลูปลชั้นใน
และมีลูปลควบคุมแรงดันดีซีของแผงพีวีที่เป็นลูปลชั้นนอก ตัวควบคุมแรงดันดีซีสร้างค่ายอดของ
กระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ผลคูณระหว่างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและค่าไซน์ของตำแหน่ง
เชิงมุมของแรงดันกริด คือกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดสร้างแรงดันเอาต์พุต
อ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจะแสดงถึงและยืนยันความ
เป็นไปได้สูงในการนำหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับ
หนึ่งและอันดับสอง มาใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา ณรงค์เดช

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิโรจน์ แสงรงทอง

NARONGDECH DUNGKRATOKE : AVERAGE CURRENT

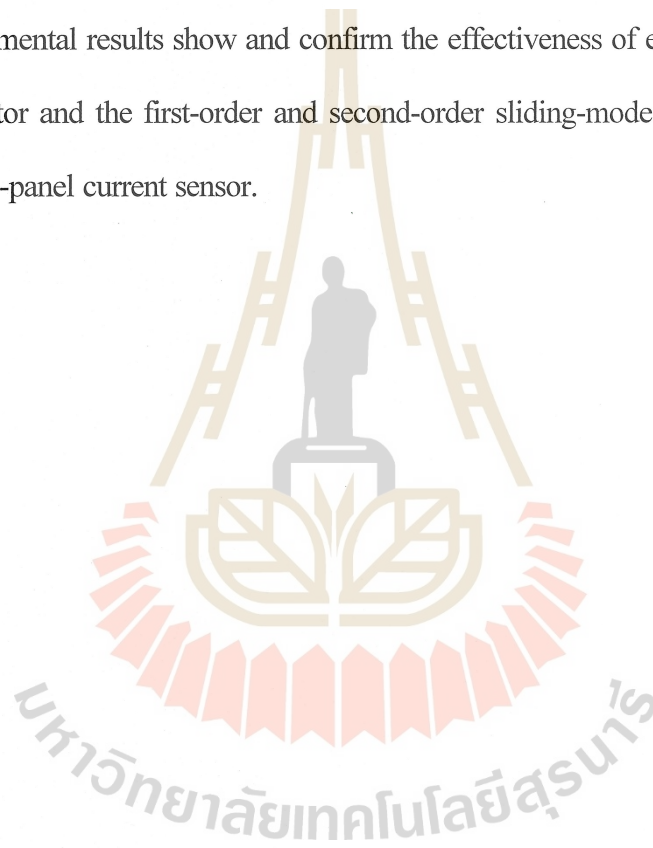
ESTIMATIONS OF PV PANEL FOR GRID-CONNECTED INVERTER.

THESIS ADVISOR : WIROTE SANGTUNGTONG, Ph.D., 155 PP.

AVERAGE CURRENT ESTIMATOR / FIRST-ORDER SLIDING-MODE
OBSERVER / SECOND-ORDER SLIDING-MODE OBSERVER / SINGLE-
PHASE PV INVERTER

This thesis presents an estimation of the average current flowing from the PV panel connected to the capacitor and the input side of a single-phase single-stage full-bridge PWM inverter. Such an inverter has an output side connected to the inductor and the AC grid. The average current estimator directly calculates the average current of the PV panel whereas the first-order and second-order sliding-mode observers evaluate the instantaneous current of the PV panel and then the averaging unit calculates the average of the instantaneous current. The closed-loop control system consists of a voltage-source type PV inverter, PV panel connected in parallel with capacitors, inductor connected in series with AC grid, PWM unit, grid-voltage sensor, grid-current sensor, PV-panel voltage sensor, voltage controller, grid-current controller, phase-locked loop, MPPT, and the average current estimator or sliding-mode observer which replaces PV current sensor. The phase-locked loop receives the AC-grid voltage and computes the sine of the angular position of the grid voltage. The MPPT obtains the average PV-panel voltage and the estimated average PV-panel current. The product between the average voltage and current is the average power generated by the PV panel and MPPT uses the slope of the curve between the mean power and voltage in order to increase or decrease the voltage reference of the PV panel. The PWM unit compares the output-voltage reference of the inverter with

a high-frequency triangular carrier signal and then creates four gate signals driving four IGBTs in the inverter. The closed-loop control system has the inner loop controlling the grid current and the outer loop controlling the PV-panel voltage. The voltage controller yields the grid-current peak reference. The product between the grid-current peak reference and the sine of the angular position of the grid voltage is the grid-current reference. The current controller yields the output-voltage reference of the inverter. The simulation results and the experimental results show and confirm the effectiveness of employing the average current estimator and the first-order and second-order sliding-mode observers in order to replace the PV-panel current sensor.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature

อรรถศักดิ์ เกษมทรัพย์

Advisor's Signature

วิรัตน์ แสงทอง

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ดำเนินงานวิทยานิพนธ์ จึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และหน่วยงานอื่น ๆ ที่ให้ทุนวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือทางด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

อาจารย์ ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนการค้นหาค้นหาบทความ ทางวิชาการหรือข้อมูลที่มีความสำคัญยังต้องงานวิจัยรวมทั้งการจัดส่งบทความไปยังงานประชุมทางวิชาการและวารสารทางวิชาการระดับชาติ รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา

เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา การติดต่อประสานงานและข้อคิดในด้านต่าง ๆ อย่างดีมาโดยตลอด

เจ้าหน้าที่ บุคลากร ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิชาการตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ครู-อาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านต่าง ๆ ที่ผ่านมามาในอดีตจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณปู่ คุณย่า รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน คนสำคัญของใจ ที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ณรงค์เดช ดิ่งกระโทก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4 สมมติฐานการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยก่อนหน้านี้ที่สัมพันธ์กับวิทยานิพนธ์.....	7
3 ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกรีด.....	12
3.1 บทนำ.....	12
3.2 ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า.....	12
3.3 แผงพีวีและการติดตามกำลังงานสูงสุด.....	17
3.4 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวี.....	21
4.1	บทนำ.....	21
4.2	แบบจำลองพลวัตของอินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกะรีดเอซี	21
4.3	หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	23
4.4	ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อนอันดับหนึ่ง	25
4.5	ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อนอันดับสอง	28
5	ผลการจำลองสถานการณ์.....	38
5.1	บทนำ.....	38
5.2	ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย.....	38
5.3	ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อน.....	50
5.3.1	ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อนอันดับหนึ่ง	50
5.3.2	ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อนอันดับสอง.....	60
6	ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์.....	73
6.1	บทนำ.....	73
6.2	ผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	73
6.3	ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อน	83
6.3.1	ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์ที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อนอันดับหนึ่ง	83
6.3.2	ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์ที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื้อนอันดับสอง.....	95

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7 สรุปและข้อเสนอแนะ	108
รายการอ้างอิง	110
ภาคผนวก	111
ภาคผนวก ก โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335.....	111
ภาคผนวก ข การปรับจูนค่าเกณฑ์ควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุม กระแสไฟฟ้ากริด.....	133
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	136
ประวัติผู้เขียน	155



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยก่อนหน้าที่น่าสนใจที่สัมพันธ์กับวิทยานิพนธ์.....	7
5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	43
5.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี.....	47
5.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งาน หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจาก ค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	49
5.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อน อันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี.....	53
5.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อน อันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี.....	57
5.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งาน ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่าง จากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	60
5.7 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อน อันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	63
5.8 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อน อันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	67
5.9 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งาน ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่าง จากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	70
6.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้า เฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง.....	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้า เฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง.....	80
6.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่า กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ ของอินเวอร์เตอร์พีวี	83
6.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อน อันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง.....	87
6.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อน อันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง.....	91
6.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจาก ค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	94
6.7 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อน อันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง.....	98
6.8 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อน อันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง.....	102
6.9 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจาก ค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี	105

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดียวที่เชื่อมต่อกรีดเอชซี	12
3.2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกรีดเอชซีที่มีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยตรง	16
3.3 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกรีดเอชซีที่มีตัวสังเกตสถานะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี	16
3.4 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีและกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังงานและแรงดันของแผงพีวี	17
3.5 ความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะระหว่างกำลังงานและแรงดันของแผงพีวี	19
4.1 อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกรีดเอชซี	21
4.2 แผนภาพของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	24
4.3 โครงสร้างของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	27
4.4 โครงสร้างของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง	36
5.1 ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์	40
5.2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์	41
5.3 ฟังก์ชันของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์	42
5.4 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีแดง) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์เท่ากัน กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีเขียว) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	44
5.5 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	45

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย45
5.7	แรงดันกริดเอชซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย46
5.8	แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย48
5.9	แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย48
5.10	แรงดันกริดเอชซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย49
5.11	ฟังก์ชันของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์52
5.12	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีแดง) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์เท่ากัน กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีเขียว) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง.....54
5.13	กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว55
5.14	แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง55

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	56
5.16 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	56
5.17 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว	58
5.18 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	58
5.19 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	59
5.20 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	59
5.21 ฝั่งงานของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์	62
5.22 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีแดง) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์เท่ากัน กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีเขียว) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง	64
5.23 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง.....	65
5.25 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจาก แผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง.....	66
5.26 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะ อยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง	66
5.27 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้า ขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว	68
5.28 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิง ที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งาน ตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง	68
5.29 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจาก แผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง.....	69
5.30 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะ อยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง	69
5.31 กระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่เกิดจากการวัดและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจาก การประมาณค่าในสถานะอยู่ตัว	71
5.32 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่เกิดจากการวัด กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดจากการคำนวณ โดยตรง และค่าเฉลี่ยของ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการประมาณค่า.....	71
6.1 ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เทียมเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน การทดลอง.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้ในการทดลอง ที่มีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยตรง	75
6.3 หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลอง	76
6.4 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีเขียว) ของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสถานะอยู่ตัว	78
6.5 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	78
6.6 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	79
6.7 แรงดันกริดเอชซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	79
6.8 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีเขียว) ของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสถานะอยู่ตัว	81
6.9 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	81
6.10 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	82
6.11 แรงดันกริดเอชซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	82

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12	แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้ในการทดลอง ที่มีตัวสังเกตสถานะ ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี85
6.13	ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง.....86
6.14	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อน อันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว88
6.15	กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้า ขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว88
6.16	แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิง ที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งาน ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง.....89
6.17	แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจาก แผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง89
6.18	แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะ อยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง90
6.19	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อน อันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว92
6.20	กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้า ขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว92
6.21	แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิง ที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งาน ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง.....93

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.22 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	93
6.23 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	94
6.24 ตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองที่ใช้ในการทดลอง	97
6.25 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว	99
6.26 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว	99
6.27 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนาค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง	100
6.28 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง	100
6.29 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง	101
6.30 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว	103
6.31 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.32	แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง 104
6.33	แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง..... 104
6.34	แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง 105
6.35	กราฟคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้า (i_{sa}) และแรงดัน (v_{sa}) ของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์เทียม 106
6.36	กราฟคุณลักษณะของกำลังงาน (P_{sa}) และแรงดัน (v_{sa}) ของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์เทียม 107



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน การใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการรณรงค์การประหยัดพลังงานไฟฟ้า และการใช้พลังงานไฟฟ้าที่คุ้มค่า เนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในแต่ละวัน ผู้ผลิตไฟฟ้าจึงต้องใช้วัตถุดิบเพิ่มมากขึ้นในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ คือวัตถุดิบโดยส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า วัตถุดิบดังกล่าวจะมีปริมาณที่ลดลงอย่างรวดเร็วและปล่อยมลพิษทางอากาศถึงสิ่งแวดล้อม พลังงานสะอาดหรือพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ คือทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจแทนที่ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานแสงอาทิตย์คือพลังงานสะอาดและได้นำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างกว้างขวางและทั่วโลก ประเทศไทยมีฟาร์มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar farm) หลายแห่ง และหน่วยงานของรัฐได้สนับสนุนให้อาคาร บ้านเรือน และที่พักอาศัย ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงฟิวดินหลังคา (solar rooftop) การใช้แผงฟิวดินผลิตพลังงานไฟฟ้าจึงได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นและกระจายตัวทั่วประเทศ

เมื่อพิจารณาการใช้งานแผงฟิวดินที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าถึงโหลดหรือกริดเอซี (AC grid) ของการไฟฟ้า วงจรแปลงผันกำลังจะเชื่อมต่อกันกลางระหว่างแผงฟิวดินและโหลด หรือเชื่อมต่อกันกลางระหว่างแผงฟิวดินและกริดเอซี เนื่องจากแผงฟิวดินคือแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าดิซี วงจรแปลงผันกำลังที่ใช้จึงเป็นอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (pulse-width modulation : PWM) ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage-source inverter) แผงฟิวดินหลังคาโดยส่วนใหญ่ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าถึงกริดเอซีเฟสเดียวจะเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว (H-bridge) ที่มีไอจีบีทีหรือมอสเฟตกำลัง 4 ตัว และทำหน้าที่แปลงปริมาณทางไฟฟ้าดิซี (ปริมาณทางไฟฟ้ากระแสตรง) ไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าเอซี (ปริมาณทางไฟฟ้ากระแสสลับ) ที่มีความถี่ 50 Hz เมื่ออินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันเอซีที่มีค่าอาร์เอ็มเอสน้อยกว่าค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันกริดเอซีไซน์ซอชอยด์ หม้อแปลงเพิ่มแรงดันจะเชื่อมต่อกันกลางระหว่างอินเวอร์เตอร์และกริดเอซี อินเวอร์เตอร์มีด้านเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองหรือฟิลเตอร์ (filter) เพราะกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดหรือกระแสไฟฟ้ากริดจะต้องมีรูปคลื่นไซน์ซอชอยด์หรือใกล้เคียงกับไซน์ซอชอยด์ อินเวอร์เตอร์ที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อกับแผง

พีวีหรืออินเวอร์เตอร์พีวีมีฮาร์ดแวร์ของลูปควบคุมที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลปริมาณทางกายภาพและทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมตัวแปรสถานะ

ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดเอชจะประกอบด้วยตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด ตัวควบคุมแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงพีวี เฟสล็อกลูป (phase-locked loop : PLL) เอ็มพีพีที (maximum power point tracker : MPPT) และหน่วยสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM module) ที่ใช้ขาขาเกตของ ไอจีบีทีหรือมอสเฟตกำลัง เฟสล็อกลูปหรือวงล็อกเฟสทำหน้าที่ประมาณค่าตำแหน่งเชิงมุม (ωt) และค่าไซน์ตำแหน่งเชิงมุม ($\sin(\omega t)$) ของแรงดันกริดเอช เอ็มพีพีทีทำหน้าที่ค้นหาหรือทำนายแรงดันดีซีอ้างอิงของแผงพีวีที่ผลิตกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด เอ็มพีพีทีที่ใช้งานอาจจะเป็นเอ็มพีพีทีชนิดการรบกวนและสังเกต (perturb and observe : P&O) ที่ใช้ความชันของกราฟเส้นโค้งระหว่างกำลังงานเฉลี่ยและแรงดันเฉลี่ยของแผงพีวีค้นหาแรงดันดีซีอ้างอิงดังกล่าว กำลังงานเฉลี่ยของแผงพีวีในช่วงระยะเวลา 10 ms คือผลคูณระหว่างแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมแผงพีวีในช่วงระยะเวลา 10 ms และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวีในช่วงระยะเวลา 10 ms ตัวควบคุมแรงดันดีซีต้องการสัญญาณป้อนกลับของแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงพีวีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดต้องการสัญญาณป้อนกลับของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอชและต้องการสัญญาณป้อนไปหน้าของแรงดันกริดเอช ดังนั้นระบบควบคุมวงปิดจึงต้องมีเซนเซอร์วัดแรงดันของแผงพีวี เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอช และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้รับสัญญาณวัดที่ส่งออกมาจากเซนเซอร์ทุกตัวแต่ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานมีสถาปัตยกรรมและทรัพยากรที่สนับสนุนการคำนวณที่ซับซ้อนในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก หรือไมโครคอนโทรลเลอร์มีการทำงานที่รวดเร็วมาก (ถาวร หินซุย และคณะ, 2558) ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม ตัวสังเกตสถานะ หน่วยประมาณค่า หน่วยคำนวณเชิงเลข หน่วยเฝ้าตรวจ หน่วยตัดสินใจ หน่วยสื่อสาร หน่วยทำรายงานข้อมูล (data logger) และหน่วยสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ได้พร้อมกัน

แนวคิดของการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีและประมาณค่าปริมาณทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์พีวีในเวลาเดียวกันจึงมีความเป็นไปได้สูงในทางปฏิบัติ (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005) การประมาณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับปริมาณจริงที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์พีวีจะลดจำนวนของเซนเซอร์วัดปริมาณทางไฟฟ้าที่ใช้งานได้เนื่องจากเฟสล็อกลูปต้องการแรงดันกริดขณะหนึ่ง สัญญาณป้อนไปหน้าคือแรงดันกริดขณะหนึ่ง สัญญาณป้อนกลับคือกระแสไฟฟ้ากริดขณะหนึ่งและแรงดันดีซีขณะหนึ่งของแผงพีวี และเอ็มพีพีทีที่ต้องการแรงดันเฉลี่ยของแผงพีวีและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวีจึงมีผลกระทบต่อสมรรถนะของลูปควบคุมน้อยกว่า และถ้าค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงระยะเวลา 10 ms มีความถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของ

กระแสไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากแผงพีวี แผนการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าจะใช้แทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีได้ ทำให้ลดจำนวนของเซนเซอร์วัดปริมาณทางไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบควบคุม (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005) แผนการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าอาจจะเป็นหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย หรือตัวสังเกตสถานะ แผนการประมาณค่านี้จะอยู่ในรูปของซอฟต์แวร์หรือชุดคำสั่งที่กำหนดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะใช้แบบจำลองด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีโดยตรง และตัวสังเกตสถานะมีโครงสร้างหลักที่เป็นแบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์และประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวี และคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีโดยตรง

1.2.2 ศึกษาตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งและตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้รับจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่เกิดจากการประมาณค่า

1.2.3 จำลองสถานการณ์และทดลองระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกรีดเอชในกรณีที่ใช้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลอง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การใช้โปรแกรม Matlab-Simulink และชุดบล็อกระบบไฟฟ้ากำลัง (power system block sets) จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกรีดเอชในกรณีที่ใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

1.3.2 ชุดทดลองคือพลานต์ (plant) ที่ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวีที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุและด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่ดับเบิลยูเอ็มชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีด้านเอาต์พุตที่เชื่อมต่อการต่ออนุกรมของแอลฟิลเตอร์ (L-filter) และด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่มีด้านทุติยภูมิเชื่อมต่อกับกริดเอช 220 V_{RMS} 50 Hz นอกจากนี้พลานต์มีเซนเซอร์วัดแรงดันของแผงพีวี เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอช และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด

1.3.3 ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดเอชประกอบด้วย พลานต์ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอช ตัวควบคุมแรงดันดีซีของแผงพีวี เฟสล็อกกลูป เอ็มพีพีที หน่วยประมวลผลกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย หรือตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง หรือตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง และหน่วยสร้างสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มที่ใช้จับขาเกตของ ไอจีบีที หรือมอสเฟตกำลัง 4 ตัว

1.3.4 แสงที่ใช้ในการทดลองคือ แสงสว่างเลียนแบบแสงอาทิตย์ (แสงอาทิตย์เทียม) หรือแสงอาทิตย์จริงอย่างใดอย่างหนึ่ง เพราะแสงอาทิตย์จริงมีระดับของการแผ่รังสีหรือระดับความเข้ม (solar irradiance) ที่ไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงเกือบตลอดเวลา ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่ถ้าแสงที่ใช้ในการทดลองคือแสงสว่างเลียนแบบแสงอาทิตย์ แผงพีวีต้องมีตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดแสงสว่างเลียนแบบแสงอาทิตย์ ทำให้แผงพีวีได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสงและมีจุดการทำงานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเช่นเดียวกัน

1.3.5 แรงดันดีซีอ้างอิงของแผงพีวีที่ได้จากการค้นหาของเอ็มพีพีทีอาจจะไม่ตรงกับจุดเอ็มพีพีทีหรือจุดการทำงานที่ทำให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในสถานะอยู่ตัว เพราะเอ็มพีพีทีใช้แรงดันเฉลี่ยของแผงพีวีในช่วงระยะเวลา 10 ms และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีในช่วงระยะเวลา 10 ms ค้นหาหรือทำนายแรงดันดีซีอ้างอิงดังกล่าว แผงพีวีที่เชื่อมต่อกับด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์อาจจะมีแรงดันดีซีที่มีความพลัว (ripple) สูงและจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีที่มีความพลัวสูงเช่นเดียวกัน

1.3.6 กริดเอช 220 V_{RMS} 50 Hz มีรูปคลื่นไซน์ซอซด์ที่ไม่มีฮาร์โมนิกปะปน และกริดเอชมีสภาพปกติ

1.3.7 การใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) ปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอชและตัวควบคุมแรงดันดีซี

1.4 สมมติฐานการวิจัย

1.4.1 หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าจริงที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี

1.4.2 หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสามารถนำมาใช้แทนที่หรือลดการใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีได้

1.5 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.5.1 พิจารณากำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีที่สามารถส่งผ่านถึงกริดเอชไอได้เท่านั้น นั่นคือแผงพีวีจะต้องมีแรงดันดีซีเฉลี่ยที่ตกคร่อมมากเพียงพอที่ทำให้กริดเอชไอไม่จ่ายกำลังงานไฟฟ้าย้อนกลับมาถึงตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ และในทางปฏิบัติแผงพีวีจะเชื่อมต่อนุกรมกับไดโอดที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าจากกริดเอชไอไหลย้อนกลับมาถึงแผงพีวี

1.5.2 อินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดเอชไอที่ใช้งานคืออินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดี่ยว (single-phase single-stage full-bridge inverter)

1.5.3 แบบจำลองด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ จะนำมาสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

1.5.4 จำลองสถานการณ์และทดลองระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดเอชไอในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เปรียบเทียบสมรรถนะของแรงดันดีซีเฉลี่ยที่ตกคร่อมแผงพีวีและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอชไอ และเปรียบเทียบสมรรถนะของการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีในกรณีที่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตสถานะมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.6.1 องค์ความรู้ที่ใช้ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี

1.6.2 ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลอง

1.6.3 บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับประเทศหรือในระดับนานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

รูปเล่มรายงานวิทยานิพนธ์มีเนื้อหาที่ประกอบด้วยจำนวน 7 บท และแต่ละบทนำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี

บทที่ 3 กล่าวถึงระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดเอช

บทที่ 4 กล่าวถึงการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสอง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้รับจากชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างแผงพีวีและกริดเอซีจะทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแผงพีวีถึงกริดเอซี เมื่อพิจารณางานวิจัยก่อนหน้าที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีที่เชื่อมต่อกับด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ องค์ความรู้ดังกล่าวมีการตีพิมพ์เผยแพร่ในจำนวนที่น้อยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แต่องค์ความรู้ก็คือแนวคิดเริ่มต้นและแนวคิดพื้นฐานของการทำวิทยานิพนธ์ที่ต้องการประยุกต์ใช้งานและเปรียบเทียบสมรรถนะของแผนการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่ซับซ้อนและไม่ซับซ้อน ก่อนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ งานที่สำคัญคือการทบทวนงานวิจัยก่อนหน้าที่ประกอบด้วยปีที่ตีพิมพ์ คณะผู้วิจัย และสรุปประเด็นและสาระที่เกี่ยวข้อง

2.2 งานวิจัยก่อนหน้าที่สัมพันธ์กับวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยก่อนหน้าที่สัมพันธ์กับวิทยานิพนธ์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2005	I.-S. Kim and M.-J. Youn	ได้นำเสนอระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีภาคเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีเฟสเดียว ระบบวงปิดมีรูปแบบควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่เป็นลูบชั้นในและลูบควบคุมแรงดันดีซีของแผงพีวีที่เป็นลูบชั้นนอก ตัวควบคุมพีไอควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมพีทีมีแรงดันกริดป้อนไปหน้าควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด เอ็มพีพีทีชนิดการรั้งความและสังเกตสร้างแรงดันอ้างอิงของแผงพีวีตัวสังเกตสถานะ โหมตการเลื่อนอันดับหนึ่งได้รับแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีที่เกิดจากการวัด กระแสไฟฟ้ากริดที่เกิดจากการวัด และสัญญาณควบคุมการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ และใช้สัญญาณวัดดังกล่าว และสัญญาณควบคุม นำมาประมาณค่า

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยก่อนหน้านี้ที่สัมพันธ์กับวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		แรงดันของแผงพีวี และกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และป้อนค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าถึงเอ็มพีพีที กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่ามีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีในกรณีที่อินเวอร์เตอร์และตัวสังเกตสถานะมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากันและแตกต่างกัน แต่กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่ามีความผิดพลาดขณะหนึ่งในสถานะอยู่ตัว
2008	Jaime A.Moreno and Marisol Osorio	ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมและตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองชนิดอัลกอริทึมบิดเกลียวพิเศษ (supertwisting) ที่พิจารณาพจน์การแกว่งเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น และการใช้ฟังก์ชันเลียปูโนฟวิเคราะห์เสถียรภาพของจุดสมดุลและวิเคราะห์ความคงทนต่อการรบกวน (perturbation) ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงถึงตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีสมรรถนะของการประมาณค่าตัวแปรสถานะที่ดีกว่าและเร็วกว่าการประมาณค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นและตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง
2013	Fernando Jaramillo-Lopez	ได้นำเสนอระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีภาคเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีเฟสเดียว ตัวประมาณค่าโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวได้รับกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีที่เกิดจากการวัดกระแสไฟฟ้ากริดที่เกิดจากการวัด และสัญญาณควบคุมการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ และใช้สัญญาณวัดดังกล่าว สัญญาณควบคุม และค่าพารามิเตอร์ของแผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่า นำมาประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวี ความผิดพลาดของการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าจะสร้างการควบคุมสมดุลที่มีความถี่ต่ำผสมกับความถี่สูง การควบคุมสมดุลที่ผ่านการกรองให้ความถี่ต่ำผ่านจะมีค่าเฉลี่ย ตัวประมาณค่าโหมดการ-

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>เลื่อนใช้กระแสไฟฟ้าของแผงพีวีและกระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด สัญญาณควบคุม และค่าเฉลี่ยของการควบคุม สมมูล นำมาคำนวณหาความผิดพลาดของการประมาณค่า พารามิเตอร์ของแผงพีวี ความผิดพลาดนี้จะสร้างสัญญาณไม่ต่อเนื่องที่มีค่าบวกและค่าลบที่ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ของแผงพีวี</p>
2017	Fernando Jaramillo-Lopez	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีภาคเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีเฟสเดียว ตัวระบุเอกลักษณ์นิวรอลได้รับแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีที่เกิดจากการวัด กระแสไฟฟ้ากริดที่เกิดจากการวัด และสัญญาณควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ และใช้สัญญาณวัดดังกล่าว และสัญญาณควบคุม นำมาประมาณค่าแรงดันของแผงพีวี กระแสไฟฟ้ากริด แรงดันกริด และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี เอ็มพีพีทีชนิดการรั้งความและสังเกตใช้กระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่า สัญญาณควบคุม และแรงดันของแผงพีวีและกระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด นำมาคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงถึงตัวระบุเอกลักษณ์นิวรอลมีสมรรถนะของการประมาณค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่คิดตามแรงดันกริดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีตามลำดับ แต่งานวิจัยนี้ไม่แสดงรายละเอียดของโครงสร้างประสาทเทียมและกฎการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการประมาณค่าแรงดันกริดและกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี</p>

เมื่อพิจารณางานวิจัยก่อนหน้าที่สัมพันธ์กับการพัฒนาและออกแบบหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตสถานะที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี งานวิจัยดังกล่าวตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีจำนวนน้อยมาก เนื่องจากแผงพีวีเชื่อมต่อกับด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว กระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลออกจากแผงพีวีจึงมีค่าไม่คงที่และมีความพลัว แต่มี

ค่าเฉลี่ยคงที่ในสถานะอยู่ตัว และตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองประมาณค่าตัวแปรสถานะที่มีสมรรถนะดีกว่าและเร็วกว่าการประมาณค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับหนึ่ง การใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงฟิวิจึงมีความเป็นไปได้สูงในการแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า และตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองอาจจะให้การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่มีสมรรถนะดีกว่าการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับหนึ่ง เพราะแผงฟิวิ มีกระแสไฟฟ้าดิซีที่ไหลออกเปลี่ยนแปลงเกือบตลอดเวลา ตัวประมาณค่าโหมคการเลื่อนแบบปรับตัวต้องการกระแสไฟฟ้าของแผงฟิวิที่ได้จากการวัดเป็นข้อมูลหนึ่งในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงฟิวิและการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแผงฟิวิ นั่นคือตัวประมาณค่าโหมคการเลื่อนแบบปรับตัวไม่สามารถทำหน้าที่แทนเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงฟิวิได้ ตัวระบุเอกลักษณ์นิรอลได้รับตัวแปรสถานะของอินเวอร์เตอร์ฟิวิเต็มบริดจ์ที่เชื่อมต่อกรีดเฟสเดี่ยว (พลานต์) และประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงฟิวิ ตัวระบุเอกลักษณ์นิรอลจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า แต่งานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่แสดงรายละเอียดโครงสร้างของตัวระบุเอกลักษณ์นิรอลที่ชัดเจนเพียงพอในการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง การสร้างตัวระบุเอกลักษณ์นิรอลให้ใช้งานได้จึงเป็นปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้าและต้องการทรัพยากรของเวลาในการศึกษาและเขียนอัลกอริทึม และการตรวจสอบความถูกต้อง ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ฟิวิที่เชื่อมต่อกรีดเฟสเดี่ยวมีเอ็มพีพีทีที่ต้องการค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงฟิวิและค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ตกคร่อมแผงฟิวิ และระบบควบคุมวงปิดนี้ไม่มีกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงฟิวิที่เป็นสัญญาณบ่อนกลับและสัญญาณบ่อนไปหน้าของตัวควบคุม แต่ตัวสังเกตสถานะประมาณค่าตัวแปรสถานะขณะหนึ่งและกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงฟิวิ นั่นคือก่อนการบ่อนกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าถึงเอ็มพีพีที หน่วยคำนวณค่าเฉลี่ยจะนำค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งมาบวกสะสมภายในช่วงระยะเวลาครึ่งคาบของแรงดันกริด และนำผลบวกมาหารด้วยจำนวนข้อมูลของค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากการหารคือกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวิที่ได้จากการประมาณค่า เอ็มพีพีทีได้รับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า หน่วยคำนวณค่าเฉลี่ยจึงอยู่คั่นกลางระหว่างเอ็มพีพีทีและตัวสังเกตสถานะ นอกจากนี้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดจากแบบจำลองด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์สามารถประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงฟิวิได้โดยตรง

2.3 สรุป

การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวี มีสองแผนการหรือสองวิธี แผนการแรกคือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าโดยตรง และแผนการที่สองคือหน่วยประมาณค่าที่เป็นตัวสังเกตสถานะที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวี และมีหน่วยคำนวณค่าเฉลี่ยที่ได้รับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการประมาณค่าและนำค่ากระแสไฟฟ้างดลงมาคำนวณค่าเฉลี่ย นั่นคือแผนการที่สองจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยอ้อม และมีความซับซ้อนมากกว่าแผนการแรก งานวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและหน่วยประมาณค่าที่เป็นตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งและตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง พิจารณาการคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้รับจากแผนการทั้งสองที่ใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และเปรียบเทียบสมรรถนะของการคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี



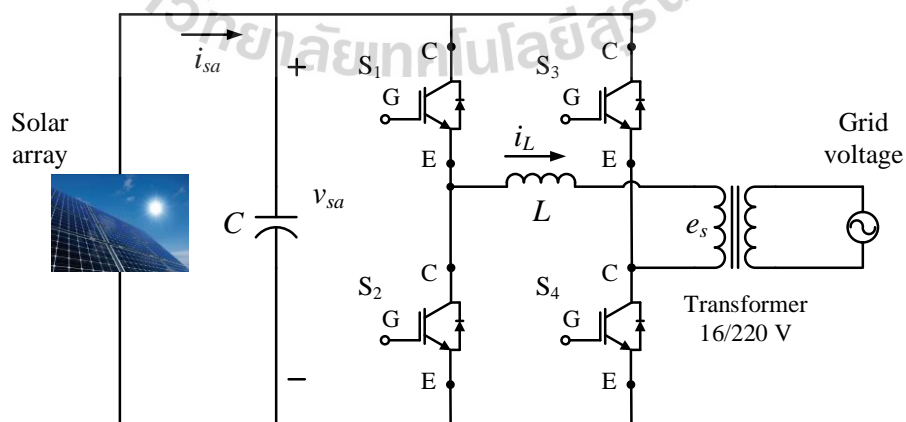
บทที่ 3

ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริด

3.1 บทนำ

แผนการควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชไอประกอบด้วยหน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีหรือเอ็มพีพีที (MPPT) ตัวควบคุมแรงดันคิซีที่ตกร่วมแผงพีวีหรือตัวควบคุมแรงดันคิซี เฟสล็อกลูป (phase-locked loop: PLL) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอชไอหรือตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด หน่วยมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) และหน่วยประมาณค่าหรือตัวสังเกตสถานะที่ทำหน้าที่แทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี อินเวอร์เตอร์มีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุและแผงพีวี ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกับแผงพีวี ตัวเก็บประจุรักษาแรงดันของแผงพีวีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง อินเวอร์เตอร์มีด้านเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับตัวเหนี่ยวนำและกริดเอชไอ ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่ออนุกรมกับกริดเอชไอ ตัวเหนี่ยวนำรักษากระแสไฟฟ้ากริดที่มีความเรียบ กริดเอชไอคือด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่มีด้านทุติยภูมิเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว 220 V_{rms} 50 Hz หรือกริดเอชไอของการไฟฟ้า

3.2 ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชไอ

ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานมี อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดียวที่แสดงในรูปที่ 3.1 (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005) แผงพีวีได้รับแสงอาทิตย์และผลิตกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงหรือกำลังงานดีซี แผงพีวีสร้างแรงดัน ดีซี (v_{sa}) และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซี (i_{sa}) ถึงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว ระบบควบคุมวง ปิดของอินเวอร์เตอร์มีหน้าที่แปลงแรงดันดีซีและกระแสไฟฟ้าดีซีไปเป็นแรงดันเอซีและ กระแสไฟฟ้าเอซีตามลำดับ อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าเอซีถึงกริดเอซีของการไฟฟ้า ระบบ ควบคุมป้อนกลับที่พิจารณาประกอบด้วยพลาตันต์และแผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวี พลาตันต์ ประกอบด้วยแผงพีวีหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ที่ดับเบิลยูเอ็มชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีไอจีบีที 4 ตัว (เซพบริดจ์) ตัวเก็บประจุ (C) ที่เชื่อมต่อขนานกับแผงพีวี กริดเอ ซี และตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่เชื่อมต่ออนุกรมกับกริดเอซี แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวี ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงพีวี (v_{sa}) เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าก ริดเอซี (i_L) เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอซี (e_s) หน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีหรือเอ็มพี พีที ตัวควบคุมแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงพีวีหรือตัวควบคุมแรงดันดีซี เฟสล็อกกลุ๊ป ตัวควบคุม กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีหรือตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด หน่วยมอดูเลตความกว้างพัลส์ หรือหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม และหน่วยประมาณค่าหรือตัวสังเกตสถานะที่ทำหน้าที่แทนที่เซนเซอร์วัด กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี

เนื่องจากแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงพีวีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และกระแสไฟฟ้า กริดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แรงดันของแผงพีวีและกระแสไฟฟ้ากริดจึงเป็นตัวแปร สถานะของพลาตันต์ กริดเอซีคือด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่มีด้านทุติยภูมิเชื่อมต่อกับ ระบบไฟฟ้าเฟสเดียวหรือกริดเอซีของการไฟฟ้า และกริดเอซีคือการรบกวน (disturbance) ของ พลาตันต์ เฟสล็อกกลุ๊ปได้รับสัญญาณวัดของแรงดันกริดเอซีที่มีความถี่เชิงมุม ω ประมาณค่าตำแหน่ง เชิงมุม (ωt) ของแรงดันกริดเอซี และคำนวณค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมนี้ ($\sin(\omega t)$) เอ็มพีพีที ได้รับแรงดันเฉลี่ย (v_{sa_avg}) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (i_{sa_avg}) ของแผงพีวี คำนวณกำลังงานเฉลี่ย และทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่ตรงกับหรือใกล้เคียงกับจุดการทำงานของแผงพีวีที่ผลิตกำลังงานมาก ที่สุดหรือเอ็มพีพี (MPP) ตัวสังเกตสถานะที่ใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า จะประมาณค่า กระแสไฟฟ้า (\hat{i}_{sa}) ขณะหนึ่งของแผงพีวี (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005) หน่วยประมาณค่า กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (average current estimator) ที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี (\hat{i}_{sa_avg}) โดยตรง อาจจะใช้งานแทนที่ตัวสังเกตสถานะ แรงดันกริดเอซีมีรูปคลื่นไซน์ซอซด์ แผงพีวีจึงมี แรงดันดีซีและกระแสไฟฟ้าดีซีที่มีความพลิว (ripple) และความถี่เท่ากับสองเท่าของความถี่ของ แรงดันกริดเอซี เอ็มพีพีทีต้องการกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี หลังจากการประมาณค่า

กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวี หน่วยคำนวณค่าเฉลี่ยจะประมาณค่าเฉลี่ย (mean) ของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง การคำนวณค่าเฉลี่ยของแรงดันขณะหนึ่งที่ได้จากการวัดและการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่เกิดจากการประมาณค่าภายในครั้งคาบระยะเวลาของแรงดันกริดเอชี่ จะดำเนินการได้ดังนี้

$$v_{sa_avg} = \frac{2}{T} \int_0^{0.5T} v_{sa} dt \quad (1)$$

$$\hat{i}_{sa_avg} = \frac{2}{T} \int_0^{0.5T} \hat{i}_{sa} dt \quad (2)$$

โดยที่ $T = \frac{1}{f}$ และ f คือความถี่ของแรงดันกริดเอชี่ เอ็มพีพีทีที่จะได้รับ $v_{sa_avg}(k)$ และ $\hat{i}_{sa_avg}(k)$ ที่เวลาปัจจุบัน k คือจำนวนครั้งของการวนซ้ำจากเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาปัจจุบัน แผงพีวีผลิตกำลังงานเฉลี่ย การคำนวณกำลังงานเฉลี่ยที่เวลาปัจจุบันจะเกิดจากผลคูณระหว่างแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมแผงพีวีและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า

$$P_{sa_avg}(k) = v_{sa_avg}(k) \cdot \hat{i}_{sa_avg}(k) \quad (3)$$

เอ็มพีพีทีที่ใช้งานคืออัลกอริทึมการรบกวนและสังเกตหรือพีแอนด์โอ (perturb and observe : P&O) (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005) เอ็มพีพีทีดังกล่าวนำความชัน (slope) ของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะระหว่างกำลังงานและแรงดัน (power-voltage characteristics) ของแผงพีวี มาใช้ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เหมาะสมของแผงพีวี (V_{ref}) หรือแรงดันอ้างอิง

$$v_{sa}^* = V_{ref}(k+1) = V_{ref}(k) + M \cdot \text{sgn} \left(\frac{P_{sa_avg}(k) - P_{sa_avg}(k-1)}{v_{sa_avg}(k) - v_{sa_avg}(k-1)} \right) \quad (4)$$

โดยที่ M คือขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงที่เหมาะสม (shift step) ตัวควบคุมแรงดันดีซีที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ จะได้รับความผิดพลาดระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (v_{sa}) ที่ได้จากการวัดและแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และสร้างขนาดหรือแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ไหล

เข้ากริดเอซี (I_L^*) หรือสร้างค่ายอด (peak) ของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005)

$$I_L^* = K_{Pv}(v_{sa} - V_{ref}) + K_{Iv} \int_0^t (v_{sa} - V_{ref}) dt \quad (5)$$

โดยที่ K_{Pv} คือค่าเกนสัดส่วนหรือค่าเกนพี และ K_{Iv} คือค่าเกนอินทิกรัลหรือค่าเกนไอของตัวควบคุมแรงดันดีซี ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงจะคูณกับสัญญาณไซน์ของตำแหน่งเชิงมุม (ωt) ของแรงดันกริดเอซี ผลคูณที่เกิดขึ้นคือกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง (i_L^*) ที่ซิงโครไนซ์ (synchronize) กับแรงดันกริดเอซี

$$i_L^* = I_L^* \sin(\omega t) \quad (6)$$

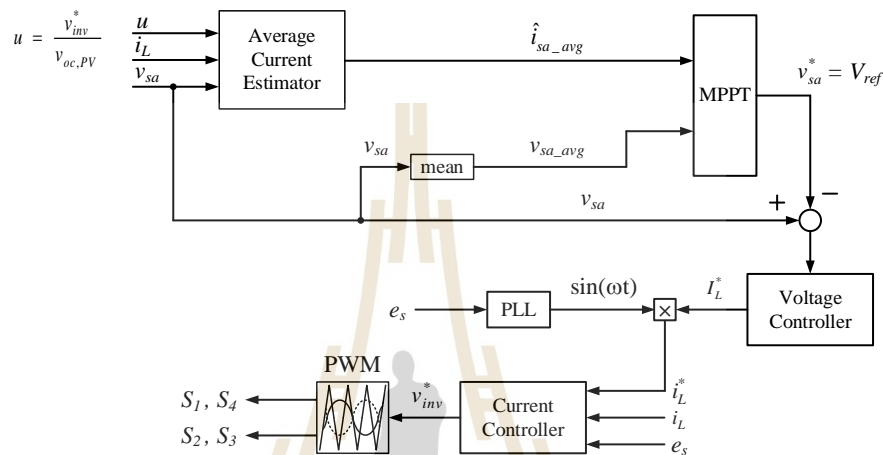
ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอและการป้อนไปหน้า (feedforward) จะได้รับความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีที่ได้จากการวัด (i_L) และสร้างแรงดันอ้างอิงที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ผลบวกระหว่างแรงดันอ้างอิงที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและแรงดันกริดเอซี (e_s) ที่ได้จากการวัด คือแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ (v_{inv}^*)

$$v_{inv}^* = e_s + K_{Pi}(i_L^* - i_L) + K_{Ii} \int_0^t (i_L^* - i_L) dt \quad (7)$$

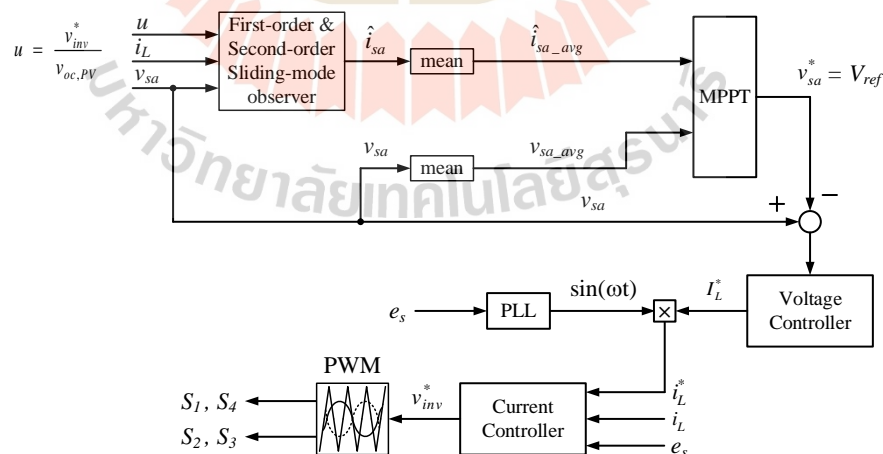
โดยที่ K_{Pi} คือค่าเกนสัดส่วนหรือค่าเกนพี และ K_{Ii} คือค่าเกนอินทิกรัลหรือค่าเกนไอของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด หน่วยพีดับเบิลยูเอ็มชนิดขั้วเดียว (unipolar) จะนำแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง การเปรียบเทียบนี้จะให้การมอดูเลตความกว้างพัลส์และสร้างขบวนสัญญาณพัลส์ 4 สัญญาณ (S_1, S_2, S_3 และ S_4) ที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลง หน่วยพีดับเบิลยูเอ็มป้อนขบวนสัญญาณพัลส์ถึงขาเกตของไอจีบีทีแต่ละตัว ลำดับและรูปแบบการสวิตช์ของไอจีบีที 4 ตัวจะผลิตแรงดันเอซีพีดับเบิลยูเอ็ม แผนการควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดเอซี จะแสดงได้ในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 นอกจากนี้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์จะนำมาใช้สร้างสถานะของการสวิตช์ (u) สมมูลที่ป้อนถึงตัวสังเกตสถานะและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

$$u = \frac{v_{inv}^*}{V_{oc, PV}} \tag{8}$$

โดยที่ $V_{oc, PV}$ คือแรงดันเปิด (open-circuit voltage) ของแผงฟิวิ สถานะของการสวิตช์สมมูลมีค่าอยู่ในช่วง $-1 \leq u \leq 1$



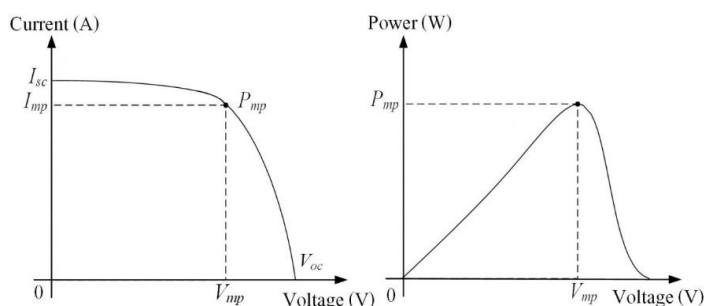
รูปที่ 3.2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์ฟิวิที่เชื่อมต่อกับกริดเอซซีที่มีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวิโดยตรง



รูปที่ 3.3 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์ฟิวิที่เชื่อมต่อกับกริดเอซซีที่มีตัวสังเกตสถานะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงฟิวิ

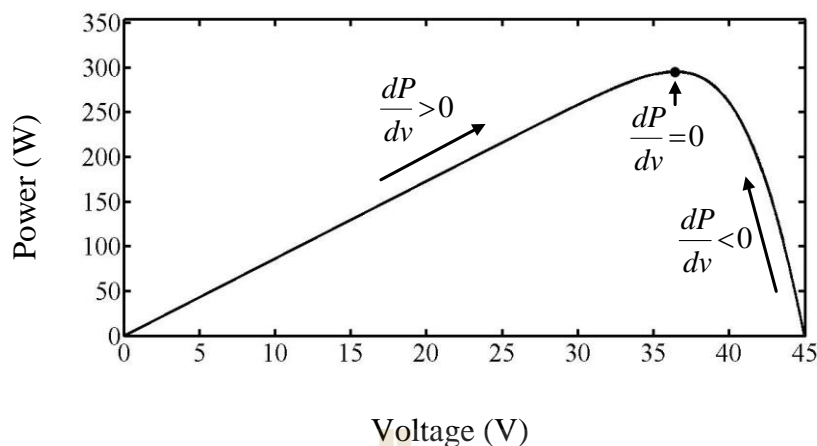
3.3 แผงพีวีและการติดตามกำลังงานสูงสุด

แผงพีวีเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า แผงพีวีสร้างแรงดันคิซีจ่ายกระแสไฟฟ้าคิซี และผลิตกำลังงานไฟฟ้า แผงพีวีมีเส้นโค้งคุณลักษณะไม่เชิงเส้น (nonlinear characteristics) ของกระแสไฟฟ้าและแรงดัน ($i-v$ curves) เส้นโค้งคุณลักษณะในแต่ละเส้นมีจุดเอ็มพีพี (MPP: maximum power point) เพียงแค่จุดเดียวที่แสดงได้ในรูปที่ 3.4 และแผงพีวีมีเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลังงานและแรงดัน ($p-v$ curves) ในแต่ละเส้นที่มีจุดสูงสุดหรือจุดเอ็มพีพีเพียงแค่หนึ่งจุดเช่นเดียวกัน แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่บนเส้นโค้งคุณลักษณะและอาจจะมีการทำงานที่ไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีหรือไม่อยู่ใกล้กับจุดเอ็มพีพี นั่นคือแผงพีวีอาจจะไม่ผลิตกำลังงานมากที่สุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้น เมื่อแสงอาทิตย์มีระดับความเข้มที่เปลี่ยนแปลงและหรืออุณหภูมิโดยรอบมีการเปลี่ยนแปลง แผงพีวีจะมีเส้นโค้งคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและมีเส้นโค้งคุณลักษณะเส้นใหม่ แผงพีวีจึงมีจุดการทำงานที่เปลี่ยนแปลงถึงตำแหน่งใหม่ และสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม ถ้าผู้ใช้งานต้องการให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากที่สุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง แผนการควบคุมวงปิดต้องมีหน่วยติดตามกำลังงานสูงสุดหรือเอ็มพีพี (MPPT: maximum power point tracker) ที่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005) ถ้าแผนการควบคุมมีการทำงานที่ถูกต้อง แผนการควบคุมจะบังคับให้แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่เหมาะสมและผลิตกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด (P_{max}) หรือผลิตกำลังงานเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับกำลังงานมากที่สุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้น ถ้าแผงพีวีไม่ได้เชื่อมต่อเข้ากับโหลดหรือผู้ใช้งานเปิดวงจรชั่วคราว แผงพีวีจะมีแรงดันเปิดวงจร (open-circuit voltage: V_{oc}) แต่ถ้าผู้ใช้งานลัดวงจรชั่วคราว แผงพีวีจะจ่ายกระแสไฟฟ้ลัดวงจร (short-circuit current: I_{sc}) เส้นโค้งคุณลักษณะไม่เชิงเส้นในแต่ละเส้นมีแรงดันเปิดวงจรค่าเดียวและมีกระแสไฟฟ้ลัดวงจรค่าเดียว



รูปที่ 3.4 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีและ
กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังงานและแรงดันของแผงพีวี

เอ็มพีพีที่จะค้นหาและทำนายค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ที่ทำให้แอมป์พีผลิตกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดหรือผลิตกำลังงานเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด เนื่องจากแอมป์พีมีแรงดันขณะหนึ่ง (v_{sa}) ที่ตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง (i_{sa}) ที่ไหลออกไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงในลักษณะรายคาบหรือมีความพลัวในสถานะอยู่ตัว แอมป์พีจะผลิตกำลังงานขณะหนึ่งที่ไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงในลักษณะรายคาบเช่นเดียวกัน แต่แอมป์พีมีแรงดันเฉลี่ย (v_{sa_avg}) กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (i_{sa_avg}) และกำลังงานเฉลี่ย (P_{sa_avg}) ที่เกือบคงที่ เอ็มพีพีที่ได้รับแรงดันเฉลี่ยของแอมป์พีภายในช่วงเวลา 10 ms และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (\hat{i}_{sa_avg}) ภายในช่วงเวลา 10 ms เอ็มพีพีที่คำนวณกำลังงานเฉลี่ยที่เท่ากับผลคูณระหว่างแรงดันเฉลี่ยและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยดังกล่าว แต่เอ็มพีพีที่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงภายในช่วงเวลา 40 ms เอ็มพีพีที่จะนำกำลังงานเฉลี่ยและแรงดันเฉลี่ยที่เวลาปัจจุบันและที่เวลาข้างหน้า 40 ms ก่อนหน้านี้ มาใช้คำนวณหาความชันของกราฟเส้น โค้งคุณลักษณะระหว่างกำลังงานและแรงดันที่แสดงได้ในรูปที่ 3.5 และเอ็มพีพีที่นำความชันของกราฟเส้น โค้งคุณลักษณะและแรงดันอ้างอิงที่เวลาข้างหน้า 40 ms ก่อนหน้านี้ มาใช้ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เวลาปัจจุบัน ถ้าความชันที่ได้จากการคำนวณมีค่าบวก แรงดันอ้างอิงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าความชันมีค่าลบ แรงดันอ้างอิงจะมีค่าลดลง และถ้าความชันมีค่าศูนย์ แรงดันอ้างอิงจะมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และเอ็มพีพีจะทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่ตรงกับจุดการทำงานของแอมป์พีที่ผลิตกำลังงานมากที่สุดหรือเอ็มพีพี แต่ในทางปฏิบัติ หลังจากเอ็มพีพีที่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่ใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงที่ตรงกับเอ็มพีพี เอ็มพีพีจะไม่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่ตรงกับเอ็มพีพี เอ็มพีพีที่เพิ่มและลดแรงดันอ้างอิงอย่างสลับกัน แรงดันอ้างอิงจึงมีค่าที่ใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงที่ตรงกับเอ็มพีพี เอ็มพีพีที่มีพลวัตของการเปลี่ยนแปลงที่ช้ากว่าลูปควบคุมแรงดันดีซีและลูปควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่มีคาบระยะเวลาการสุ่มวัด 50 μ s เอ็มพีพีที่อาจจะทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่ทำให้แอมป์พีผลิตกำลังงานเฉลี่ยน้อยกว่ากำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด (P_{max}) ในสถานะอยู่ตัว เพราะแอมป์พีมีแรงดันดีซีและกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไม่คงที่และมีความพลัว



รูปที่ 3.5 ความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะระหว่างกำลังงานและแรงดันของแผงพีวี

3.4 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานคือเซนเซอร์ชนิดปรากฏการณ์ฮอลล์แบบวงเปิด (open loop hall-effect current sensor) ที่วัดกระแสไฟฟ้าดีซีและวัดกระแสไฟฟ้าเอซี (ถาวร หินชุย, 2558) เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้านี้ประกอบด้วยวงจร 2 ด้านที่แยกกราวด์ออกจากกัน วงจรด้านปฐมภูมิมีขดลวดปฐมภูมิจำนวน 2 ชุดที่เชื่อมต่อกับอนุกรมกับโหลดหรือระบบไฟฟ้าที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน และวงจรด้านทุติยภูมิสร้างแรงดันเอาต์พุต (secondary voltage: V_S) ที่สัมพันธ์เชิงเส้นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ (primary current: I_P) วงจรด้านทุติยภูมิได้รับแรงดันดีซี (ไฟเลี้ยง) จากแหล่งจ่ายกำลัง ขดลวดปฐมภูมิจำนวน 2 ชุดมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมหรือแบบขนาน ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิคัด (primary nominal current: I_{PN}) น้อยกว่าในสถานะอยู่ตัว และมีพิสัยของกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ (primary current measuring range: I_{PM}) แคบกว่าในสถานะชั่วคราว แต่ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีการเชื่อมต่อแบบขนาน เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิคัดมากกว่าในสถานะอยู่ตัว และมีพิสัยของกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิกว้างกว่าในสถานะชั่วคราว เมื่อขดลวดปฐมภูมิมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิคัด ($I_P = I_{PN}$) เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าจะสร้างแรงดันเอาต์พุตที่เท่ากับแรงดันทุติยภูมิพิคัด (secondary nominal voltage: V_{SN}) ($V_S = V_{SN}$) แต่ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเต็มพิสัยของกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ ($I_P = I_{PM}$) เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าจะสร้างแรงดันเอาต์พุตที่เต็มพิสัยของแรงดันทุติยภูมิ (secondary voltage measuring range: V_{SM}) ในสถานะชั่วคราว ($V_S = V_{SM}$) เมื่อกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิคือกระแสไฟฟ้าดีซีที่ต้องการวัดที่มีหน่วย A_{dc} แรงดันเอาต์พุตคือสัญญาณวัดดีซีที่มีหน่วย V_{dc} และเมื่อ

กระแสไฟฟ้าปฐมภูมิคือกระแสไฟฟ้าเอซึที่ต้องการวัดที่มีหน่วย A_{rms} แรงดันเอาต์พุตคือสัญญาณวัดเอซึที่มีหน่วย V_{rms}

3.5 สรุป

อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซึทำหน้าที่แปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซึ และจ่ายกระแสไฟฟ้าเอซึถึงกริดเอซึ อินเวอร์เตอร์มีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแผงพีวี และตัวเก็บประจุ แผงพีวีได้รับแสงอาทิตย์ เปลี่ยนรูปพลังงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซี ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกับขานกับเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีที่ติดคร่อมแผงพีวี ตัวเก็บประจुरักษาการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของแรงดันแผงพีวี อินเวอร์เตอร์มีด้านเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน ตัวเหนี่ยวนำรักษาการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้ากริด ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับอนุกรมกับเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซึ เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอซึเชื่อมต่อกับขานกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่เป็นกริดเอซึ หม้อแปลงมีด้านทุติยภูมิที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว $220 V_{\text{rms}}$ 50 Hz หรือกริดของการไฟฟ้า ระบบควบคุมป้องกันของอินเวอร์เตอร์มีเฟสล็อกที่คำนวณค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริดเอซึ มีตัวควบคุมแรงดันดีซีที่ทำหน้าที่คุมค่าแรงดันที่ติดคร่อมแผงพีวี มีตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่บังคับให้กระแสไฟฟ้ากริดซิงโครไนซ์กับแรงดันกริดเอซึ มีเอ็มพีพีทีที่ค้นหาและทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เหมาะสมของแผงพีวี มีหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม และมีตัวสังเกตสถานะหรือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ทำหน้าที่แทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี ถ้าแผงพีวีสร้างแรงดันได้มากเพียงพอและแผนการควบคุมวงปิดมีการทำงานที่ถูกต้อง ระบบควบคุมดังกล่าวจะส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแผงพีวีถึงกริดเอซึ และแผงพีวีจะผลิตกำลังงานมากที่สุดหรือผลิตกำลังงานที่ใกล้เคียงกับกำลังงานมากที่สุด

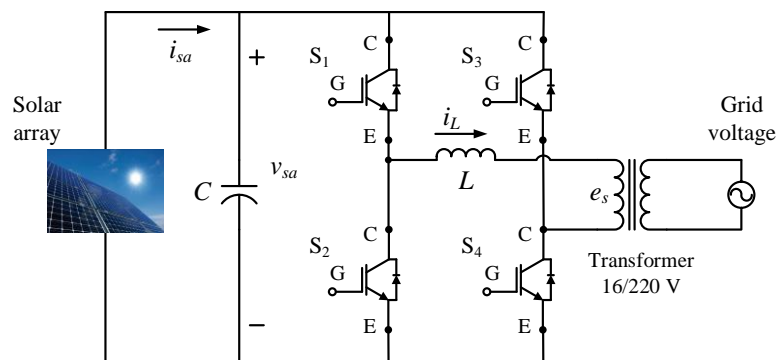
บทที่ 4

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวี

4.1 บทนำ

อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชมีแผนการควบคุมย้อนกลับที่ต้องการเซนเซอร์วัดปริมาณทางไฟฟ้า วงจรปรับสภาพสัญญาณได้รับสัญญาณวัดจากเซนเซอร์ ขยายและกรองสัญญาณวัด และส่งสัญญาณวัดถึงตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยหรือตัวสังเกตสถานะได้รับสัญญาณวัดจากเซนเซอร์ และคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี หน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดหรือเอ็มพีพีทีได้รับค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่เกิดจากการคำนวณ และทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่ตรงกับหรือใกล้เคียงกับการผลิตกำลังงานมากที่สุดของแผงพีวี ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์แปลงปริมาณทางไฟฟ้าดีซีไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าเอชซี และมีเซนเซอร์วัดแรงดันของแผงพีวี เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอชซี และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดเอชซี ระบบควบคุมไม่มีเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เพราะระบบควบคุมมีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยหรือมีตัวสังเกตสถานะที่ทำหน้าที่แทนเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี บทนี้จะอธิบายหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่แบ่งออกเป็นหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

4.2 แบบจำลองพลวัตของอินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชซี



รูปที่ 4.1 อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชซี

อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกรีดเอชซีที่แสดงในรูปที่ 4.1 มีแบบจำลองพลวัตคือ (I.-S. Kim and M.-J. Youn, 2005)

$$\frac{dv_{sa}}{dt} = \frac{1}{C_n}(-i_L \cdot u + i_{sa}) + \Delta f \quad (4.1)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_{sa} \cdot u - e_s) \quad (4.2)$$

โดยที่ t คือเวลา (วินาที: s)

v_{sa} คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและตัวเก็บประจุ (โวลต์: V)

i_{sa} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (แอมแปร์: A)

e_s คือแรงดันกริดเอชซี (โวลต์: V)

i_L คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและไหลเข้ากริดเอชซี (แอมแปร์: A)

C_n คือค่าความจุที่ระบุตามตัวเลขของตัวเก็บประจุ (ฟารัด: F)

L คือค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี: H)

$\Delta f = -\frac{\Delta C}{C_n} \cdot \frac{dv_{sa}}{dt}$ คือการรบกวนที่เกิดจากค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เบี่ยงเบนจากค่าความจุ

ที่ระบุตามตัวเลข Δf มีขนาดไม่มากกว่าค่าที่แน่นอนค่าหนึ่งหรือ Δf มีขอบเขต

$C = C_n + \Delta C$ คือค่าความจุของตัวเก็บประจุ (ฟารัด: F)

ΔC คือการเบี่ยงเบนของค่าความจุของตัวเก็บประจุ (ฟารัด: F)

$i_L \cdot u$ คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ (แอมแปร์: A)

$v_{sa} \cdot u$ คือแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (โวลต์: V)

u คือสถานะของการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่ได้จากแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ (v_{inv}^*) ถ้าสวิตช์ S_1 และ S_4 นำกระแสไฟฟ้า (on) และสวิตช์ S_2 และ S_3 ไม่

นำกระแสไฟฟ้า (off) จะได้ว่า $u = +1$ แต่ถ้าสวิตช์ S_1 และ S_4 ไม่นำกระแสไฟฟ้า (off) และสวิตช์ S_2 และ S_3 นำกระแสไฟฟ้า (on) จะได้ว่า $u = -1$

4.3 หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่คำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีโดยตรง การพิจารณาแผงพีวีและตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว จะได้รับแบบจำลองพลวัตอันดับหนึ่ง แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและตัวเก็บประจุคือตัวแปรสถานะ การเฉลี่ยแบบจำลองพลวัตดังกล่าวจะสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เอ็มพีพีทีได้รับค่าเฉลี่ยของแรงดันแผงพีวีและค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่เกิดจากการคำนวณ และทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวีเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (i_{sa}) แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและตัวเก็บประจุ (v_{sa}) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและไหลเข้ากริดเอซี (i_L) มีความสัมพันธ์กัน หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะใช้ v_{sa} และ i_L ที่ได้จากการวัด นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของ i_{sa} การพิจารณาสมการที่ (4.1) ที่ไม่มีการรบกวนการเบี่ยงเบนของค่าความจุของตัวเก็บประจุ กล่าวคือ $\Delta f = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{dv_{sa}}{dt} = \frac{1}{C_n}(-i_L \cdot u + i_{sa}) \quad (4.3)$$

การหาค่าเฉลี่ยของสมการที่ (4.3) ภายในหนึ่งคาบระยะเวลา (T) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่มีความพลัว จะได้ว่า

$$C_n \frac{dv_{sa}}{dt} = -i_L \cdot u + i_{sa} \Rightarrow C_n dv_{sa} = -(i_L \cdot u)dt + i_{sa}dt \Rightarrow$$

$$\int_t^{t+T} C_n dv_{sa} = - \int_t^{t+T} (i_L \cdot u)dt + \int_t^{t+T} i_{sa}dt \Rightarrow$$

$$\int_t^{t+T} i_{sa}dt = \int_t^{t+T} (i_L \cdot u)dt + C_n(v_{sa}(t+T) - v_{sa}(t)) \Rightarrow$$

และได้รับการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี

$$\hat{i}_{sa_avg} = \frac{\int_t^{t+T} i_{sa}dt}{T} = \frac{\int_t^{t+T} (i_L \cdot u)dt}{T} + C_n \frac{v_{sa}(t+T) - v_{sa}(t)}{T} \quad (4.4)$$

โดยที่ $u = \frac{v_{inv}^*}{V_{oc, PV}}$ เพราะถ้า $u = +1$ และ $u = -1$ สถานะของการสวิตช์จะมีความไม่ต่อเนื่อง การคำนวณค่าเฉลี่ยโดยตรงและการประมาณค่าตัวแปรสถานะจะได้รับผลกระทบจากความไม่ต่อเนื่องดังกล่าว แต่เมื่อ $u = \frac{v_{inv}^*}{V_{oc, PV}}$ จะได้ว่า $-1 \leq u \leq +1$ และมีความสมมูลกับสถานะของการสวิตช์ แต่มีการเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่องมากกว่า การคำนวณค่าเฉลี่ยโดยตรงและการประมาณค่าตัวแปรสถานะจะได้รับผลกระทบจากความไม่ต่อเนื่องน้อยลง การคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี มีคาบระยะเวลา 10 ms เพราะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีมีความถี่ที่มีความถี่ 100 Hz ความถี่นี้มีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ของแรงดันกริดเอช

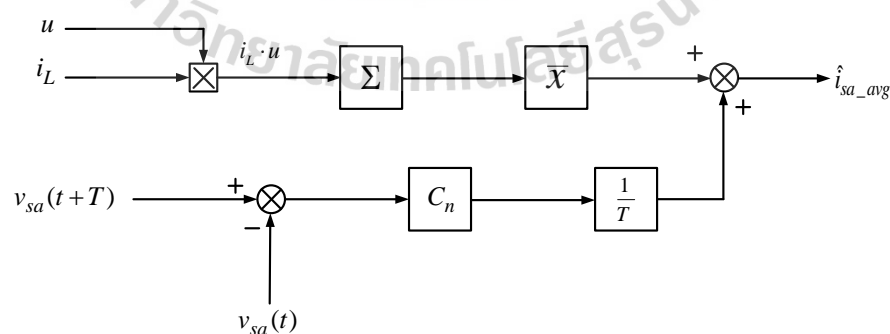
พจน์ $\frac{\int_t^{t+T} (i_L \cdot u) dt}{T}$ คือค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ในช่วงระยะเวลา 10 ms เมื่อแผนการควบคุมมีคาบระยะเวลาการสุ่ม 50 μ s ค่ากระแสไฟฟ้า $i_L \cdot u$ ขณะหนึ่งที่เวลาการสุ่มและซีกตัวอย่างจำนวน 200 ตัวเลข จะนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ $\frac{\int_t^{t+T} (i_L \cdot u) dt}{T} = \frac{\sum_{k=1}^{200} (i_L(k) \cdot u(k))}{200}$

พจน์ $C_n \frac{v_{sa}(t+T) - v_{sa}(t)}{T}$ คือกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุในช่วงระยะเวลา 10 ms

โดยที่ $v_{sa}(t+T)$ คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีในเวลาปัจจุบัน

$v_{sa}(t)$ คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีในเวลาก่อนหน้า 10 ms

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีแผนภาพการคำนวณที่แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

4.4 ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง

เนื่องจาก v_{sa} และ i_L มีความสัมพันธ์กัน และ v_{sa} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ตัวสังเกตสถานะจะใช้ปริมาณทางไฟฟ้า v_{sa} และ i_L ที่ได้จากการวัด นำมาประมาณค่า i_{sa} แบบออนไลน์ การสร้างตัวสังเกตสถานะมีขั้นตอนที่เริ่มต้นจากการเขียนสมการปริภูมิสถานะของแบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ สมการปริภูมิสถานะนี้มี v_{sa} และ i_{sa} เป็นตัวแปรสถานะ มี u เป็นตัวแปรอินพุต และมี v_{sa} เป็นตัวแปรเอาต์พุต

$$\frac{dv_{sa}}{dt} = \frac{1}{C_n}(-i_L \cdot u + i_{sa}) + \Delta f$$

$$\frac{di_{sa}}{dt} = \eta \approx 0$$

$y = v_{sa}$

(4.5)

โดยที่ η คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า i_{sa} เทียบกับเวลา และ y คือตัวแปรเอาต์พุตของแบบจำลองพลวัต สมการที่ (4.5) คือพลาเน็ตที่พิจารณา ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี มีโครงสร้าง (I-S. Kim and M.-J. Youn, 2005)

$$\frac{d\hat{v}_{sa}}{dt} = \frac{1}{C_n}(-i_L \cdot u + \hat{i}_{sa}) + h_1 e_y + k_1 \text{sgn}(e_y)$$

$$\frac{d\hat{i}_{sa}}{dt} = h_2 e_y$$

$$e_y = v_{sa} - \hat{v}_{sa}$$
(4.6)

$$\text{sgn}(e_y) = \begin{cases} +1 & \text{if } e_y > 0 \\ 0 & \text{if } e_y = 0 \\ -1 & \text{if } e_y < 0 \end{cases}$$

โดยที่ \hat{v}_{sa} คือการประมาณค่าของ v_{sa} , \hat{i}_{sa} คือการประมาณค่าของ i_{sa} , h_1, h_2 คือค่าเกนที่มีค่าบวก, k_1 คือค่าเกนการสวิตช์ที่มีค่าบวก และ e_y คือความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าแรงดัน v_{sa} ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลือนดังกล่าวคือตัวสังเกตลันเบอร์เจอร์ (Luenberger) ที่มีพจน์การสวิตช์ไม่เชิงเส้น ความผิดพลาดระหว่างสมการที่ (4.5) และ (4.6) คือ

$$\dot{e}_y = \frac{de_y}{dt} = \frac{1}{C_n}e_i - h_1e_y - k_1 \operatorname{sgn}(e_y) + \Delta f$$

$$\dot{e}_i = \frac{de_i}{dt} = -h_2e_y \quad (4.7)$$

โดยที่ $e_i = i_{sa} - \hat{i}_{sa}$ คือความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่ากระแสไฟฟ้า i_{sa} พจน์การสวิตช์ไม่เชิงเส้น $k_1 \operatorname{sgn}(e_y)$ สร้างโหมคการเลือนระหว่าง e_y และ \dot{e}_y ในอุดมคติ ต่อมาเลือกฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของความผิดพลาด (4.7)

$$V = \frac{1}{2}(\alpha e_y^2 + \beta e_i^2) \geq 0 \quad (4.8)$$

โดยที่ α และ β คือค่าคงที่ค่าบวก ($\alpha > 0$ และ $\beta > 0$) จากนั้นหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลา แล้วแทนค่า \dot{e}_y และ \dot{e}_i จากสมการที่ (4.7) ลงใน \dot{V} และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \alpha e_y \dot{e}_y + \beta e_i \dot{e}_i$$

$$\dot{V} = \alpha e_y \left(\frac{1}{C_n} e_i - h_1 e_y - k_1 \operatorname{sgn}(e_y) + \Delta f \right) - \beta h_2 e_i e_y$$

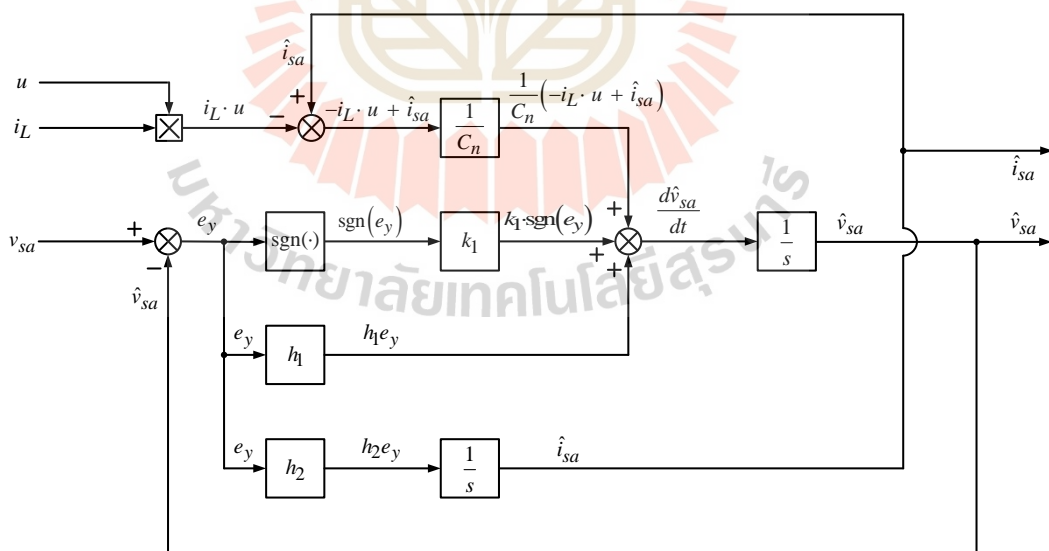
$$\dot{V} = -\alpha h_1 e_y^2 + \left(\frac{\alpha}{C_n} - \beta h_2 \right) e_i e_y + \alpha e_y (\Delta f - k_1 \operatorname{sgn}(e_y))$$

$$\dot{V} = -\alpha h_1 e_y^2 + \alpha (\Delta f e_y - k_1 |e_y|) \quad (4.9)$$

กำหนดให้ $\frac{\alpha}{C_n} = \beta h_2 \rightarrow h_2 = \frac{\alpha}{\beta C_n}$ และ $\alpha(\Delta f e_y - k_1 |e_y|) < 0 \rightarrow k_1 |e_y| > \Delta f e_y \rightarrow k_1 > \Delta f \operatorname{sgn}(e_y) \rightarrow k_1 > \max(|\Delta f|)$ โดยที่ $\max(|\Delta f|)$ คือค่ามากที่สุดของ $|\Delta f|$ และ $e_y \cdot \operatorname{sgn}(e_y) = |e_y|$ จะได้ว่า

$$\dot{V} \leq -\alpha h_1 e_y^2 \leq 0 \quad (4.10)$$

เนื่องจาก $V \geq 0$ และ $\dot{V} \leq 0$ จะได้ว่า V มีค่าไม่เพิ่มขึ้นจากเดิมหรือ V มีขอบเขต เมื่อ $e_y \neq 0$ จะได้ว่า $\dot{V} < 0$ นั่นคือ V มีค่าลดลงจนกว่า $e_y \rightarrow 0$ และ $\dot{e}_y \rightarrow 0$ ทำให้ $\dot{V} \rightarrow 0$ และ V มีค่าลู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่ง และจากสมการที่ (4.7) จะได้ว่า $\dot{e}_i \rightarrow 0$ นั่นคือ $e_i = C_n(k_1(\operatorname{sgn}(e_y))_{eq} - \Delta f)$ โดยที่ $(\operatorname{sgn}(e_y))_{eq}$ คือการควบคุมสมมูล (equivalent control) ดังนั้นตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งมีเสถียรภาพ (stable) ตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งมีโครงสร้างที่แสดงได้ในรูปที่ 4.3 และต้องมีค่าเกณฑ์มากเพียงพอที่ทำให้การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า i_{sa} มีความผิดพลาดน้อย



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่ง

4.5 ตัวสังเกตสถานะโหมตการเลื่อนอันดับสอง

สมการที่ (4.5) คือพลาเน็ตที่พิจารณา ตัวสังเกตสถานะโหมตการเลื่อนอันดับสองที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี มีโครงสร้าง (Wirote Sangtungton and Narongdech, 2020)

$$\frac{d\hat{v}_{sa}}{dt} = \frac{1}{C_n}(-i_L \cdot u + \hat{i}_{sa}) + h_1 e_y + k_1 \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y)$$

$$\frac{d\hat{i}_{sa}}{dt} = k_2 \operatorname{sgn}(e_y) + h_2 e_y \quad (4.11)$$

โดยที่ \hat{v}_{sa} คือการประมาณค่าของ v_{sa} และ \hat{i}_{sa} คือการประมาณค่าของ i_{sa} , k_1, k_2, h_1, h_2 คือค่าเกนของตัวสังเกตที่มีค่าบวก และ $e_y = v_{sa} - \hat{v}_{sa}$ คือความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี สมมติว่า $\Delta f = 0$ และ $\eta = 0$ ความผิดพลาดระหว่างสมการที่ (4.5) และ (4.11) คือ

$$\dot{e}_y = \frac{de_y}{dt} = \frac{1}{C_n} e_i - h_1 e_y - k_1 \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y)$$

$$\dot{e}_i = \frac{de_i}{dt} = -h_2 e_y - k_2 \operatorname{sgn}(e_y) \quad (4.12)$$

โดยที่ $e_i = i_{sa} - \hat{i}_{sa}$ คือความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่ากระแสไฟฟ้า i_{sa} พจน์ $k_1 \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y)$ และพจน์ $k_2 \operatorname{sgn}(e_y)$ สร้างโหมตการเลื่อนระหว่าง e_y และ \dot{e}_y ในอุดมคติ ต่อมาเลือกฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของความผิดพลาด (4.12)

$$V = 2 \frac{k_2}{C_n} |e_y| + \frac{h_2}{C_n} e_y^2 + \frac{1}{2C_n^2} e_i^2 + \frac{1}{2} \left(k_1 \sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y) + h_1 e_y - \frac{1}{C_n} e_i \right)^2 \geq 0 \quad (4.13)$$

จากนั้นหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{dV}{dt} = \frac{2k_2}{C_n} \dot{e}_y \operatorname{sgn}(e_y) + \frac{2h_2}{C_n} e_y \dot{e}_y + \frac{1}{C_n^2} e_i \dot{e}_i \\ &+ \left(k_1 \sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y) + h_1 e_y - \frac{1}{C_n} e_i \right) \left(k_1 \frac{d(\sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y))}{dt} + h_1 \dot{e}_y - \frac{1}{C_n} \dot{e}_i \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{2k_2}{C_n} \dot{e}_y \operatorname{sgn}(e_y) + \frac{2h_2}{C_n} e_y \dot{e}_y + \frac{1}{C_n^2} e_i \dot{e}_i \\ &+ k_1 \sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y) \cdot \left(\frac{k_1}{2} \frac{\dot{e}_y}{\sqrt{|e_y|}} + h_1 \dot{e}_y - \frac{1}{C_n} \dot{e}_i \right) \\ &+ h_1 e_y \cdot \left(\frac{k_1}{2} \frac{\dot{e}_y}{\sqrt{|e_y|}} + h_1 \dot{e}_y - \frac{1}{C_n} \dot{e}_i \right) \\ &- \frac{1}{C_n} e_i \cdot \left(\frac{k_1}{2} \frac{\dot{e}_y}{\sqrt{|e_y|}} + h_1 \dot{e}_y - \frac{1}{C_n} \dot{e}_i \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{2k_2}{C_n} \dot{e}_y \operatorname{sgn}(e_y) + \frac{2h_2}{C_n} e_y \dot{e}_y + \frac{1}{C_n^2} e_i \dot{e}_i \\ &+ \frac{k_1^2}{2} \dot{e}_y \operatorname{sgn}(e_y) + h_1 k_1 \dot{e}_y \sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y) - \frac{k_1}{C_n} \dot{e}_i \sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y) \\ &+ \frac{h_1 k_1}{2} \dot{e}_y \sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y) + h_1^2 e_y \dot{e}_y - \frac{h_1}{C_n} e_y \dot{e}_i \\ &- \frac{k_1}{2C_n} \frac{e_i \dot{e}_y}{\sqrt{|e_y|}} - \frac{h_1}{C_n} e_i \dot{e}_y + \frac{1}{C_n^2} e_i \dot{e}_i\end{aligned}$$

(4.14)

โดยที่ $\frac{d(\sqrt{|e_y|} \cdot \operatorname{sgn}(e_y))}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\dot{e}_y}{\sqrt{|e_y|}}$, $|e_y| = e_y \cdot \operatorname{sgn}(e_y)$, $\operatorname{sgn}^2(e_y) = 1$

และเมื่อ $e_y \neq 0$ จะได้ว่า $\frac{d \operatorname{sgn}(e_y)}{dt} = 0$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \left[\left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{2k_2}{C_n} \right) \text{sgn}(e_y) + \left(h_1^2 + \frac{2h_2}{C_n} \right) e_y + \frac{3h_1k_1}{2} \sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right. \\ & \left. - \frac{1}{C_n} \left(h_1 + \frac{k_1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \right) e_i \right] \dot{e}_y + \frac{1}{C_n} \left(\frac{2}{C_n} e_i - h_1 e_y - k_1 \sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right) \dot{e}_i \end{aligned} \quad (4.15)$$

แทนค่า \dot{e}_y และ \dot{e}_i จากสมการที่ (4.12) ลงใน \dot{V} (4.15) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_1 \left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{k_2}{C_n} \right) \sqrt{|e_y|} - h_1 \left(2k_1^2 + \frac{k_2}{C_n} \right) |e_y| + \frac{k_1^2}{C_n} e_i \text{sgn}(e_y) \\ & - k_1 \left(\frac{5h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) |e_y| \sqrt{|e_y|} - h_1 \left(h_1^2 + \frac{h_2}{C_n} \right) e_y^2 + \frac{2h_1^2}{C_n} e_y e_i \\ & + \frac{3h_1k_1}{C_n} e_i \sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) - \frac{h_1}{C_n^2} e_i^2 - \frac{k_1}{2C_n^2} \frac{e_i^2}{\sqrt{|e_y|}} \end{aligned} \quad (4.16)$$

เนื่องจาก $|e_y| = \left(\sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right)^2$, $\sqrt{|e_y|} = \frac{\left(\sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right)^2}{\sqrt{|e_y|}}$,

$$e_i \text{sgn}(e_y) = \frac{\left(\sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right) e_i}{\sqrt{|e_y|}}, \quad |e_y| \sqrt{|e_y|} = \frac{e_y^2}{\sqrt{|e_y|}}, \quad e_y = |e_y| \cdot \text{sgn}(e_y)$$

และ $e_i \sqrt{|e_y|} \text{sgn}(e_y) = \frac{e_y e_i}{\sqrt{|e_y|}}$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\dot{V} = & -k_1 \left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{k_2}{C_n} \right) \frac{\left(\sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right)^2}{\sqrt{|e_y|}} - h_1 \left(2k_1^2 + \frac{k_2}{C_n} \right) \left(\sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right)^2 \\
& + \frac{k_1^2}{C_n} \frac{\left(\sqrt{|e_y|} \cdot \text{sgn}(e_y) \right) e_i}{\sqrt{|e_y|}} - k_1 \left(\frac{5h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) \frac{e_y^2}{\sqrt{|e_y|}} - h_1 \left(h_1^2 + \frac{h_2}{C_n} \right) e_y^2 \\
& + \frac{2h_1^2}{C_n} e_y e_i + \frac{3h_1 k_1}{C_n} \frac{e_y e_i}{\sqrt{|e_y|}} - \frac{h_1}{C_n^2} e_i^2 - \frac{k_1}{2C_n^2} \frac{e_i^2}{\sqrt{|e_y|}}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
\dot{V} = & \frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \left[\begin{array}{ccc} \sqrt{|e_y|} \text{sgn}(e_y) & e_y & e_i \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} -k_1 \left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{k_2}{C_n} \right) \left(\sqrt{|e_y|} \text{sgn}(e_y) \right) + \frac{k_1^2}{2C_n} e_i \\ -k_1 \left(\frac{5h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) e_y + \frac{3h_1 k_1}{2C_n} e_i \\ \frac{k_1^2}{2C_n} \left(\sqrt{|e_y|} \text{sgn}(e_y) \right) + \frac{3h_1 k_1}{2C_n} e_y - \frac{k_1}{2C_n^2} e_i \end{array} \right] \\
& + \left[\begin{array}{ccc} \sqrt{|e_y|} \text{sgn}(e_y) & e_y & e_i \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} -h_1 \left(2k_1^2 + \frac{k_2}{C_n} \right) \left(\sqrt{|e_y|} \text{sgn}(e_y) \right) \\ -h_1 \left(h_1^2 + \frac{h_2}{C_n} \right) e_y + \frac{h_1^2}{C_n} e_i \\ \frac{h_1^2}{C_n} e_y - \frac{h_1}{C_n^2} e_i \end{array} \right]
\end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \begin{bmatrix} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \\ e_y \\ e_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -k_1 \left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{k_2}{C_n} \right) & 0 & \frac{k_1^2}{2C_n} \\ 0 & -k_1 \left(\frac{5h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) & \frac{3h_1 k_1}{2C_n} \\ \frac{k_1^2}{2C_n} & \frac{3h_1 k_1}{2C_n} & -\frac{k_1}{2C_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \\ e_y \\ e_i \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \\ e_y \\ e_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -h_1 \left(2k_1^2 + \frac{k_2}{C_n} \right) & 0 & 0 \\ 0 & -h_1 \left(h_1^2 + \frac{h_2}{C_n} \right) & \frac{h_1^2}{C_n} \\ 0 & \frac{h_1^2}{C_n} & -\frac{h_1}{C_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \\ e_y \\ e_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\dot{V} = -\frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \xi^T \Omega_1 \xi - \xi^T \Omega_2 \xi < 0 \quad (4.20)$$

$$\text{โดยที่ } \xi = \begin{bmatrix} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \\ e_y \\ e_i \end{bmatrix}, \quad \Omega_1 = \begin{bmatrix} k_1 \left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{k_2}{C_n} \right) & 0 & -\frac{k_1^2}{2C_n} \\ 0 & k_1 \left(\frac{5h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) & -\frac{3h_1 k_1}{2C_n} \\ -\frac{k_1^2}{2C_n} & -\frac{3h_1 k_1}{2C_n} & \frac{k_1}{2C_n^2} \end{bmatrix}$$

$$\text{และ } \Omega_2 = \begin{bmatrix} h_1 \left(2k_1^2 + \frac{k_2}{C_n} \right) & 0 & 0 \\ 0 & h_1 \left(h_1^2 + \frac{h_2}{C_n} \right) & -\frac{h_1^2}{C_n} \\ 0 & -\frac{h_1^2}{C_n} & \frac{h_1}{C_n^2} \end{bmatrix}$$

นั่นคือ Ω_1 และ Ω_2 ต้องเป็นเมตริกซ์จัตุรัสจำกัดบวกสมมาตร จึงจะทำให้ $\dot{V} < 0$ และตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับสองมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (asymptotically stable)

ถ้า $\|\xi\|_2 \neq 0$ จะได้ว่า $\dot{V} < 0$ และ V จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกว่า $\|\xi\|_2 = 0$ ในขณะที่ V มีค่าลดลง $\|\xi\|_2$ จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะได้ว่า $\|\xi\|_2 \rightarrow 0$, $V \rightarrow 0$, $\sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \rightarrow 0$, $e_y \rightarrow 0$ และ $e_i \rightarrow 0$ เงื่อนไขที่ทำให้เมตริกซ์ Ω_1 และ Ω_2 เป็นเมตริกซ์จำกัดบวก ($\Omega_1 > 0$ และ $\Omega_2 > 0$) คือ $4k_2h_2 > h_1^2C_n(8k_2 + 9k_1^2C_n)$ โดยที่ $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $h_1 > 0$ และ $h_2 > 0$

สมมติว่า Δf และ η มีขอบเขต กล่าวคือ $|\Delta f| \leq \delta_1\sqrt{|e_y|} + \delta_3|e_y|$ และ $|\eta| \leq \delta_2 + \delta_4|e_y|$

โดยที่ $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ และ δ_4 คือค่าคงที่บวกบางค่า

และเมื่อพิจารณาสมการที่ (4.20) ที่มี Δf และ η จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \xi^T \Omega_1 \xi - \xi^T \Omega_2 \xi + \left(\frac{3h_1k_1}{2} \Delta f - \frac{k_1}{C_n} \eta \right) \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \\ & + \left(\left(h_1^2 + \frac{2h_2}{C_n} \right) \Delta f - \frac{h_1}{C_n} \eta \right) e_y - \left(\frac{h_1}{C_n} \Delta f - \frac{2}{C_n^2} \eta \right) e_i \\ & + \frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \left(\left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{2k_2}{C_n} \right) \Delta f \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) - \frac{k_1}{2C_n} \Delta f \cdot e_i \right) \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \xi^T \Omega_1 \xi - \xi^T \Omega_2 \xi + \frac{\Delta f}{\sqrt{|e_y|}} \left(\left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{2k_2}{C_n} \right) \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) - \frac{k_1}{2C_n} e_i \right) \\ & + \Delta f \left(\frac{3h_1k_1}{2} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) + \left(h_1^2 + \frac{2h_2}{C_n} \right) e_y - \frac{h_1}{C_n} e_i \right) \\ & + \eta \left(-\frac{k_1}{C_n} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) - \frac{h_1}{C_n} e_y + \frac{2}{C_n^2} e_i \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

การพิจารณาขอบเขต Δf และ η จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 & \frac{\Delta f}{\sqrt{|e_y|}} \left(\left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{2k_2}{C_n} \right) \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) - \frac{k_1}{2C_n} e_i \right) \\
 & + \Delta f \left(\frac{3h_1 k_1}{2} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) + \left(h_1^2 + \frac{2h_2}{C_n} \right) e_y - \frac{h_1}{C_n} e_i \right) \\
 & + \eta \left(-\frac{k_1}{C_n} \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) - \frac{h_1}{C_n} e_y + \frac{2}{C_n^2} e_i \right) \\
 & \leq \frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \xi^T (\delta_1 \Delta_1 + \delta_2 \Delta_2) \xi + \xi^T (\delta_3 \Delta_1 + \Delta_3) \xi
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

ดังนั้นอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปุนอฟคือ

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{\sqrt{|e_y|}} \xi^T (\Omega_1 - \delta_1 \Delta_1 - \delta_2 \Delta_2) \xi - \xi^T (\Omega_2 - \delta_3 \Delta_1 - \Delta_3) \xi < 0 \tag{4.24}$$

โดยที่ $\Delta_1 = \begin{bmatrix} k_1^2 + \frac{2k_2}{C_n} & 0 & -\frac{k_1}{4C_n} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{4C_n} & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\Delta_2 = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{C_n} & -\frac{h_1}{2C_n} & \frac{1}{C_n^2} \\ -\frac{h_1}{2C_n} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_n^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$,

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} \frac{3h_1 k_1}{2} \delta_1 & \left(\frac{h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) \delta_1 + \frac{3h_1 k_1}{4} \delta_3 - \frac{k_1}{2C_n} \delta_4 & -\frac{h_1}{2C_n} \delta_1 \\ \left(\frac{h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) \delta_1 + \frac{3h_1 k_1}{4} \delta_3 - \frac{k_1}{2C_n} \delta_4 & \left(h_1^2 + \frac{2h_2}{C_n} \right) \delta_3 - \frac{h_1}{C_n} \delta_4 & -\frac{h_1}{2C_n} \delta_3 + \frac{1}{C_n^2} \delta_4 \\ -\frac{h_1}{2C_n} \delta_1 & -\frac{h_1}{2C_n} \delta_3 + \frac{1}{C_n^2} \delta_4 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} k_1 \left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{k_2}{C_n} \right) & 0 & -\frac{k_1^2}{2C_n} \\ 0 & k_1 \left(\frac{5h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C_n} \right) & -\frac{3h_1 k_1}{2C_n} \\ -\frac{k_1^2}{2C_n} & -\frac{3h_1 k_1}{2C_n} & \frac{k_1}{2C_n^2} \end{bmatrix} \text{ และ}$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} h_1 \left(2k_1^2 + \frac{k_2}{C_n} \right) & 0 & 0 \\ 0 & h_1 \left(h_1^2 + \frac{h_2}{C_n} \right) & -\frac{h_1^2}{C_n} \\ 0 & -\frac{h_1^2}{C_n} & \frac{h_1}{C_n^2} \end{bmatrix}$$

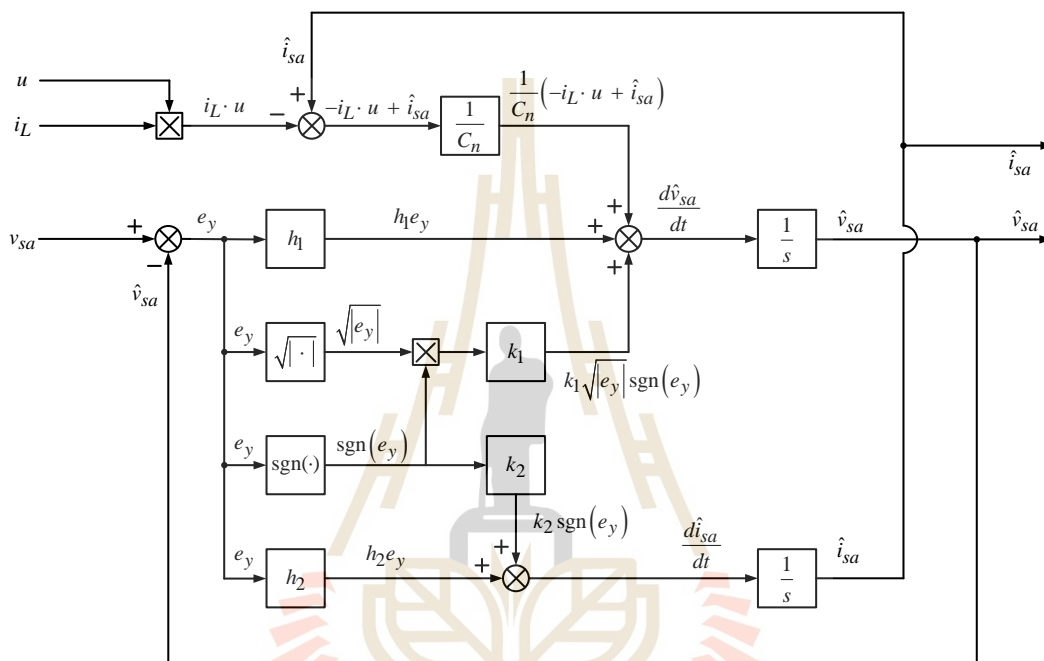
นั่นคือ $(\Omega_1 - \delta_1 \Delta_1 - \delta_2 \Delta_2)$ และ $(\Omega_2 - \delta_3 \Delta_1 - \Delta_3)$ ต้องเป็นเมตริกซ์จัตุรัสจำกัดบวกสมมาตร จึงจะทำให้ $\dot{V} < 0$ และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (asymptotically stable) ถ้า $\|\xi\|_2 \neq 0$ จะได้ว่า $\dot{V} < 0$ และ V จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกว่า $\|\xi\|_2 = 0$ ในขณะที่ V มีค่าลดลง $\|\xi\|_2$ จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะได้ว่า $\|\xi\|_2 \rightarrow 0$, $V \rightarrow 0$, $\sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \rightarrow 0$, $e_y \rightarrow 0$ และ $e_i \rightarrow 0$ การหาเงื่อนไขที่ทำให้เมตริกซ์ $(\Omega_1 - \delta_1 \Delta_1 - \delta_2 \Delta_2)$ และ $(\Omega_2 - \delta_3 \Delta_1 - \Delta_3)$ เป็นเมตริกซ์จำกัดบวก $((\Omega_1 - \delta_1 \Delta_1 - \delta_2 \Delta_2) > 0$ และ $(\Omega_2 - \delta_3 \Delta_1 - \Delta_3) > 0)$ ก็งานที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เพราะการดำเนินการทางพีชคณิตมีความซับซ้อนมาก แต่การพิจารณา $\delta_1 = \delta_3 = \delta_4 = 0$ และ $\delta_2 \neq 0$ จะได้รับเงื่อนไข

$$k_2 > \frac{h_1^2 \delta_2^2}{2k_1^2 (5h_1^2 C_n + 2h_2)} - \frac{k_1^2 C_n}{2} - \delta_2 \quad (4.25)$$

และ

$$k_2 > \frac{(5h_1^2 C_n + 2h_2)(k_1^2 C_n + 2\delta_2)^2 - C_n h_1^2 \delta_2 (6k_1^2 C_n + 11\delta_2)}{4k_1^2 C_n (h_2 - 2h_1^2 C_n)} - \frac{k_1^2 C_n}{2} - \delta_2 \quad (4.26)$$

และ $h_2 > 2h_1^2 C_n$ โดยที่ $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $h_1 > 0$ และ $h_2 > 0$ ถ้าเงื่อนไขสองเงื่อนไขนี้เป็นจริง ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับสองจะมีเสถียรภาพ เมื่อกระแสไฟฟ้า i_{sa} มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วเทียบกับเวลา ค่าเกนบวก k_2 จะต้องมีค่ามากเพียงพอที่ทำให้การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า i_{sa} มีความผิดพลาดน้อย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับสองมีโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับสอง

4.6 สรุป

บทนี้อธิบายหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแรงแฟฟี่ที่แบ่งออกเป็นหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับสอง หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแรงแฟฟี่โดยตรง แต่ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับหนึ่งและตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับสองประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแรงแฟฟี่ ดังนั้นตัวสังเกตสถานะโหมดการเลือนอันดับสองจะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่าถึงหน่วยคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า เพราะหน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดหรือเอ็มพีพีที ต้องการค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแรงแฟฟี่ที่ได้จากการประมาณค่าหรือที่ได้จากการคำนวณ หน่วยประมาณค่า

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะใช้แรงดันที่ตกรวมแผงพีวีที่ได้จากการวัด กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีที่ได้จากการวัด และสถานะของการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี และตัวสังเกตสถานะจะใช้แรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการวัด กระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด และสถานะของการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ นำมาประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวี การเลือกค่าเกินของตัวสังเกตสถานะคือขั้นตอนหนึ่งของการใช้งานตัวสังเกตสถานะที่ทำหน้าที่แทนเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และตัวสังเกตสถานะมีโครงสร้างที่แตกต่างจากหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เพราะตัวสังเกตสถานะคือแผนการคำนวณตัวแปรสถานะแบบออนไลน์วงปิด



บทที่ 5

ผลการจำลองสถานการณ์

5.1 บทนำ

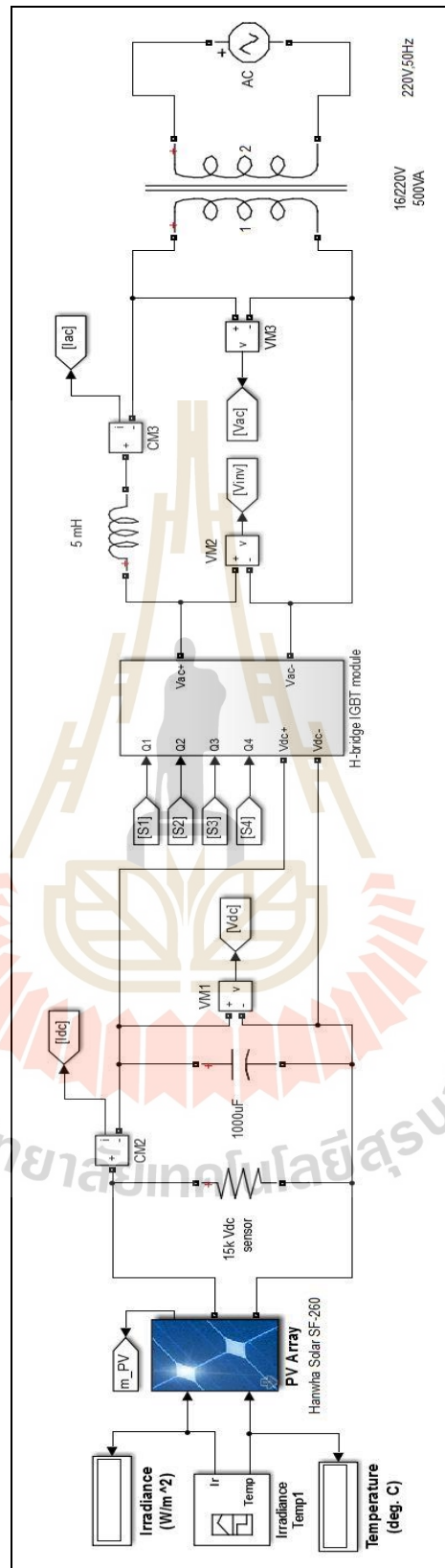
บทนี้จะกล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีภาคเดียวเฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชซี ซอฟต์แวร์แมทแล็บซิมูลิงก์ (MATLAB-Simulink) จะนำมาใช้จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวที่มีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งแทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี ผลการจำลองสถานการณ์ในทุกกรณีจะแสดงถึงการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวีที่มีจุดการทำงานใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี (แรงดันอ้างอิงที่เหมาะสม) ในสถานะอยู่ตัว และเปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิงและแรงดันดีซีเฉลี่ยที่ดักคร่อมแผงพีวี ผลการจำลองสถานการณ์ในทุกกรณีจะแสดงถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดที่ซิงโครไนซ์กับแรงดันกริดเอชซี และเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวีและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าและการคำนวณ การจำลองสถานการณ์จะพิจารณาถึงหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตสถานะที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ตหรืออินเวอร์เตอร์พีวีเฟสเดียว

5.2 ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

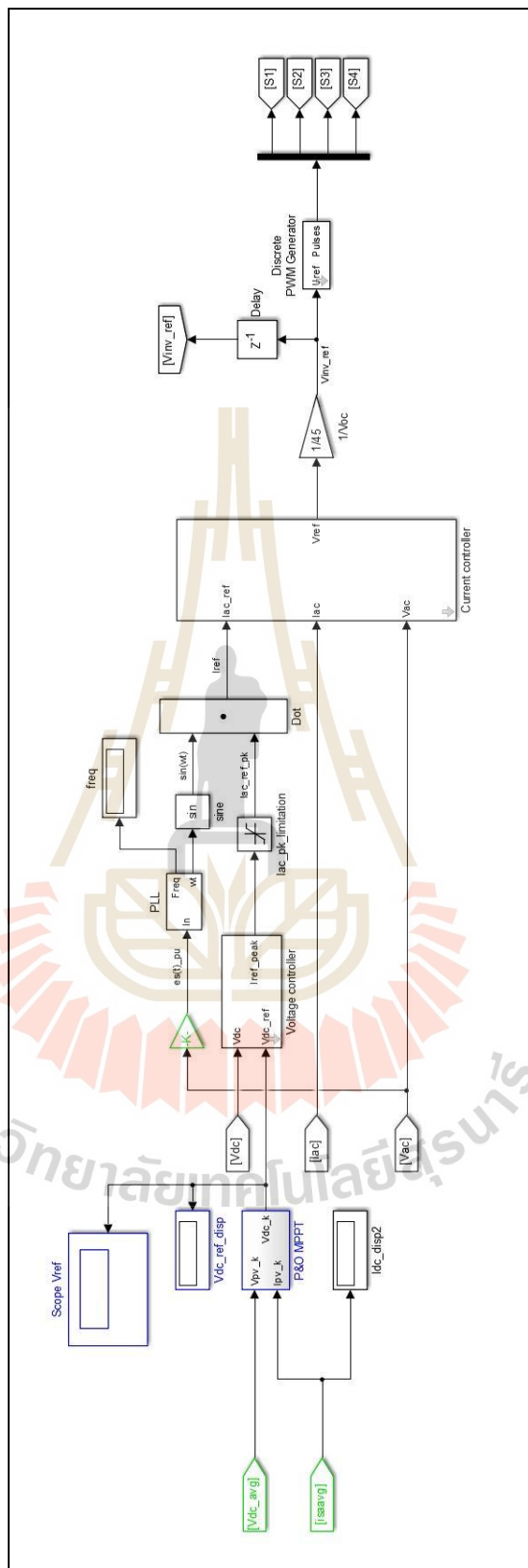
ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แผนการควบคุม และพลังงานของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จะแสดงได้ในรูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ เมื่อหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f = 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุไม่มีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ ($\Delta C = 0$) หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมี $C_n = 1000 \mu\text{F}$ และอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 5.1 ผลการจำลองสถานการณ์ให้การประมาณค่าและผลตอบสนองดังนี้ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวี (\hat{i}_{sa_avg}) (average current estimator) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของ

แผงพีวีที่ได้จากการวัด (sensor measurement) (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 5.4 เอ็มพีพีทีที่ใช้ช่วงระยะเวลาช่วงหนึ่งในการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี (V_{ref}) ที่ลดลงจากแรงดันเปิด ($V_{oc, PV}$) จนถึงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะชั่วคราว และเอ็มพีพีทีจะทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสลับกันใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 5.5 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (actual voltage) (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิง (voltage reference) ในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีจึงผลิตและจ่ายกำลังงานเฉลี่ย ($P_{sa_avg} = v_{sa_avg} i_{sa_avg}$) ที่ใกล้เคียงกับกำลังงานมากที่สุด (P_{max}) หรือแผงพีวีมีจุดการทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีที แผงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) ที่มีความพลัวและแผงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ที่มีความพลัวเล็กน้อยในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.6 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 5.7 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานสามารถจ่ายกำลังงานเฉลี่ยถึงกริดเอซีได้ การใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี จึงมีความเป็นไปได้

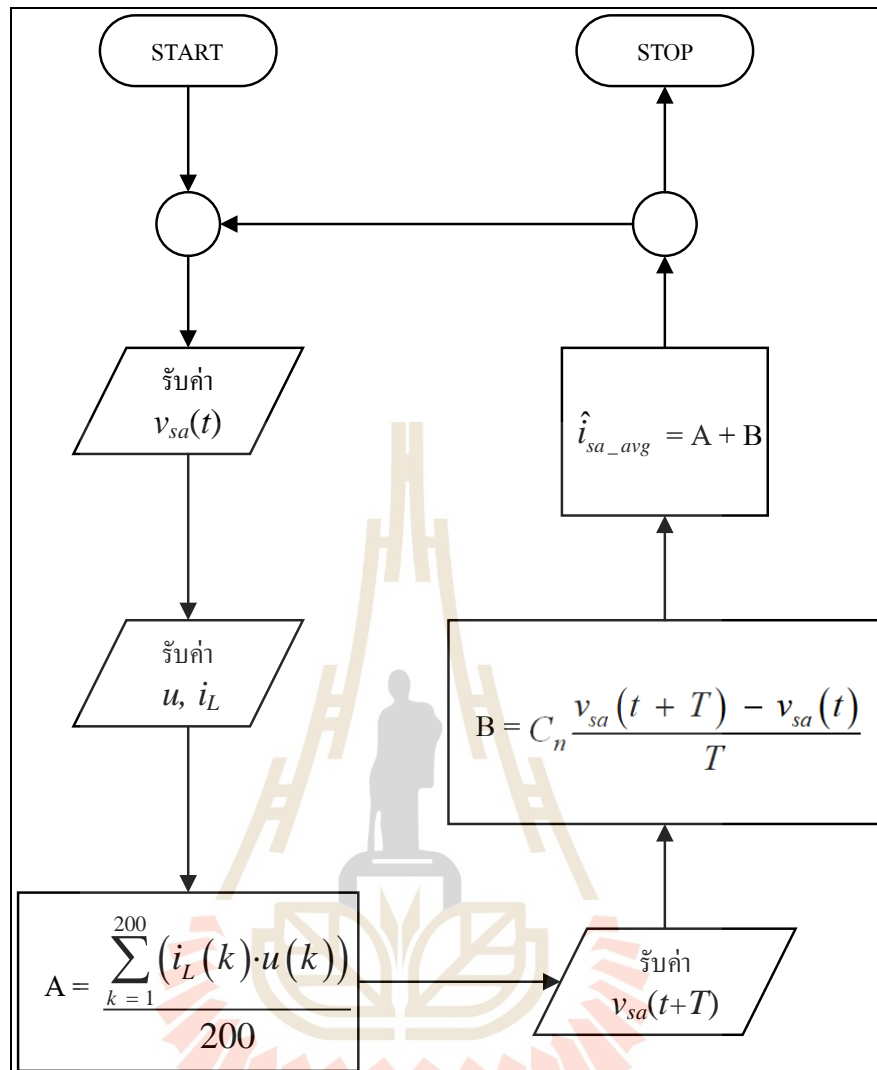
เมื่อหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f \neq 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุมีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมี $C_n = 500 \mu F$ แต่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu F$ จะได้ว่า $\Delta C = 500 \mu F$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 5.2 ผลการจำลองสถานการณ์จะให้การประมาณค่าและผลตอบสนองที่เหมือนกับผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวี (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 5.4 เอ็มพีพีทีที่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี (V_{ref}) ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 5.8 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) และมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.9 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.10 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแสดงในตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.1 ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์



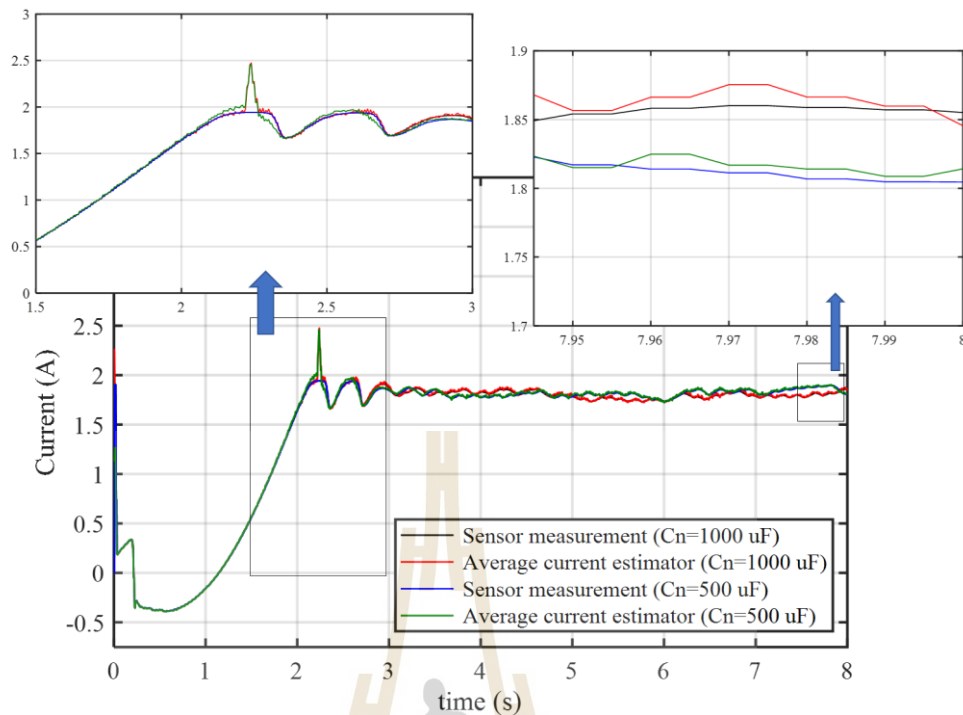
รูปที่ 5.2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์



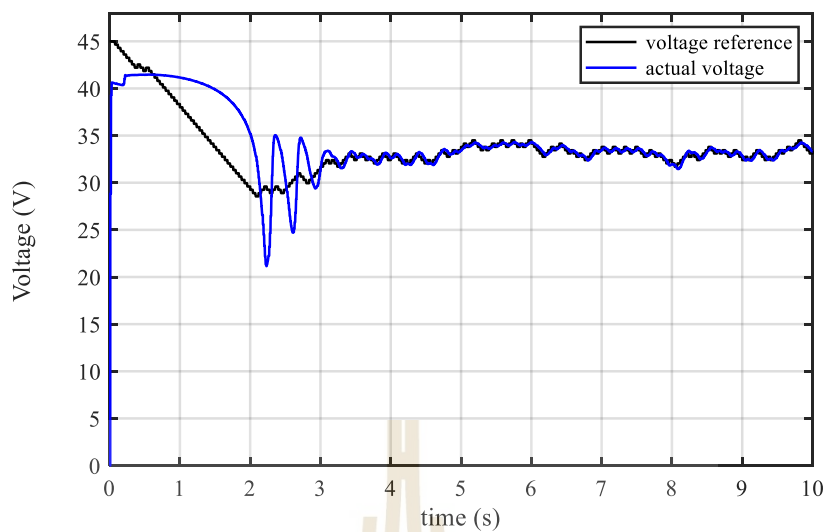
รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันของหน่วยประมวลผลค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

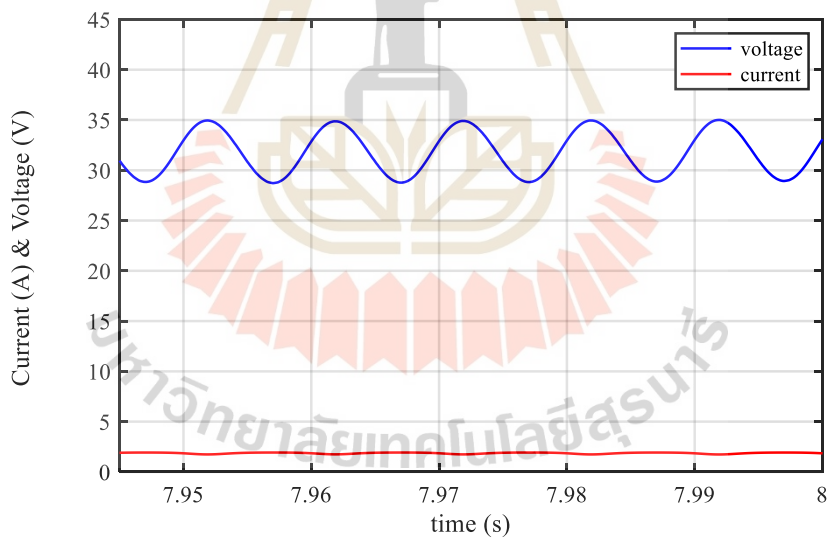
แผงพีวี	ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์	225 W/m ²
	อุณหภูมิของแผงพีวี : T	308 K (25 °C)
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.8 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	33.25 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	10 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	C_n	1000 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำงาน	0.08 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



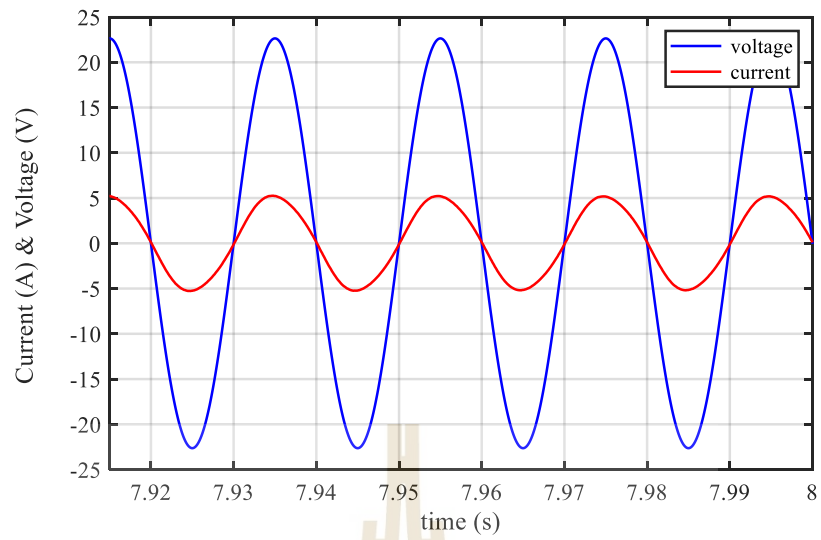
รูปที่ 5.4 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวที่ได้อาจการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
 ที่ได้อาจการคำนวณ (สีแดง) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์เท่ากัน
 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวที่ได้อาจการวัด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
 ที่ได้อาจการคำนวณ (สีเขียว) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน
 ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 5.5 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 5.6 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

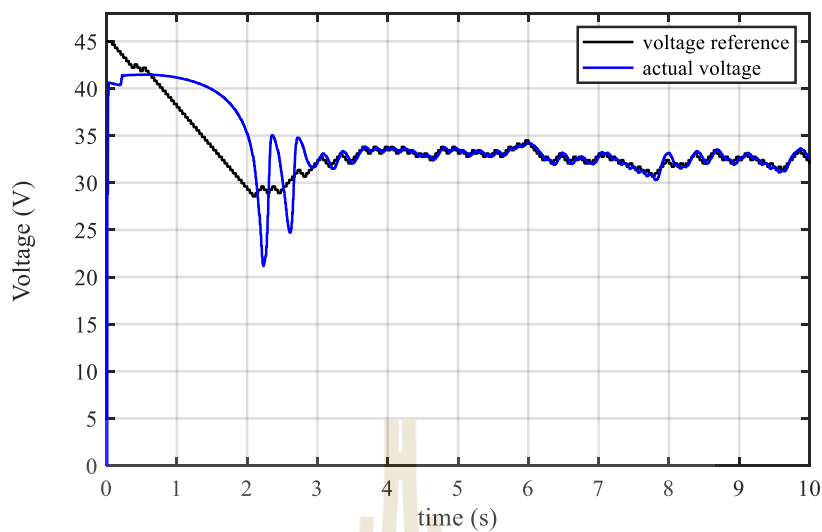


รูปที่ 5.7 แรงดันกริดเอชซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว
ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

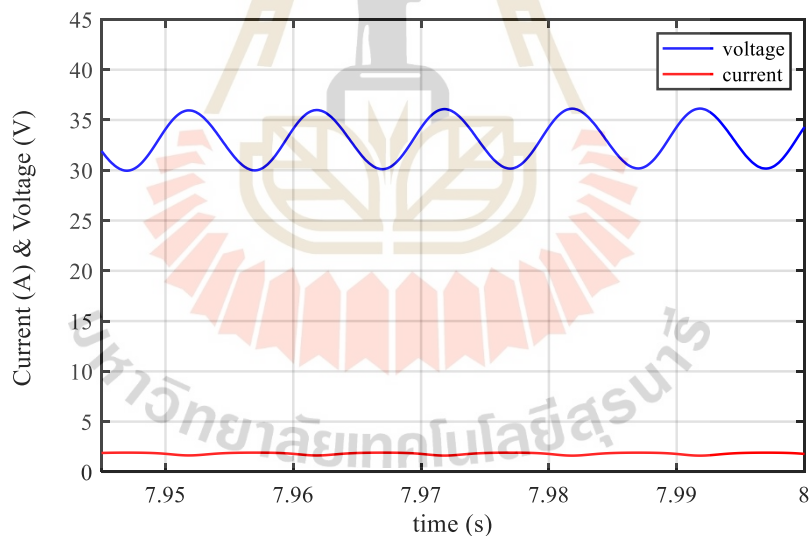


ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

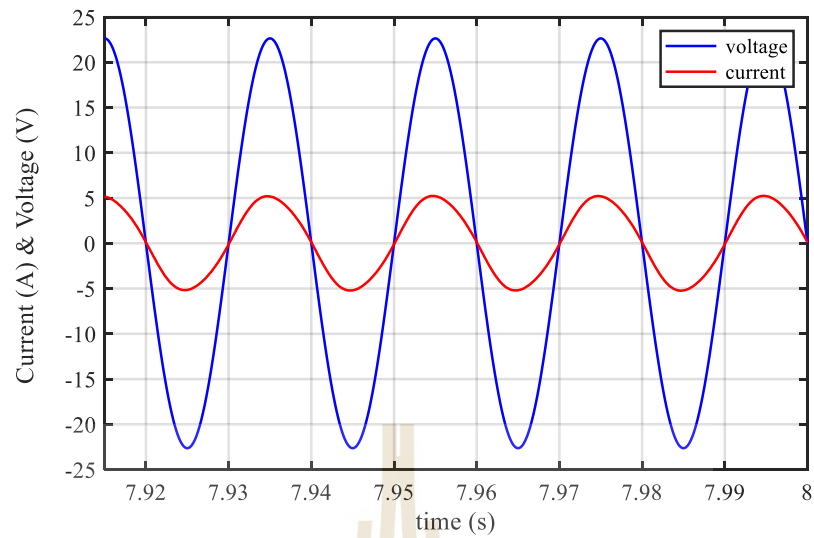
แผงพีวี	ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์	225 W/m ²
	อุณหภูมิของแผงพีวี : T	308 K (25 °C)
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.8 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	33.25 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	10 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	C_n	500 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำนาย	0.08 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



รูปที่ 5.8 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 5.9 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 5.10 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว
ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณ
ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของ
อินเวอร์เตอร์พีวี

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี ในสถานะอยู่ตัว	1.87 A	1.82 A
แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม แผงพีวีในสถานะอยู่ตัว	33.5 V	33.5 V
ค่ายอดของแรงดันกริดเอซี	23 V	23 V
ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริด	5 A	5 A

5.3 ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อน

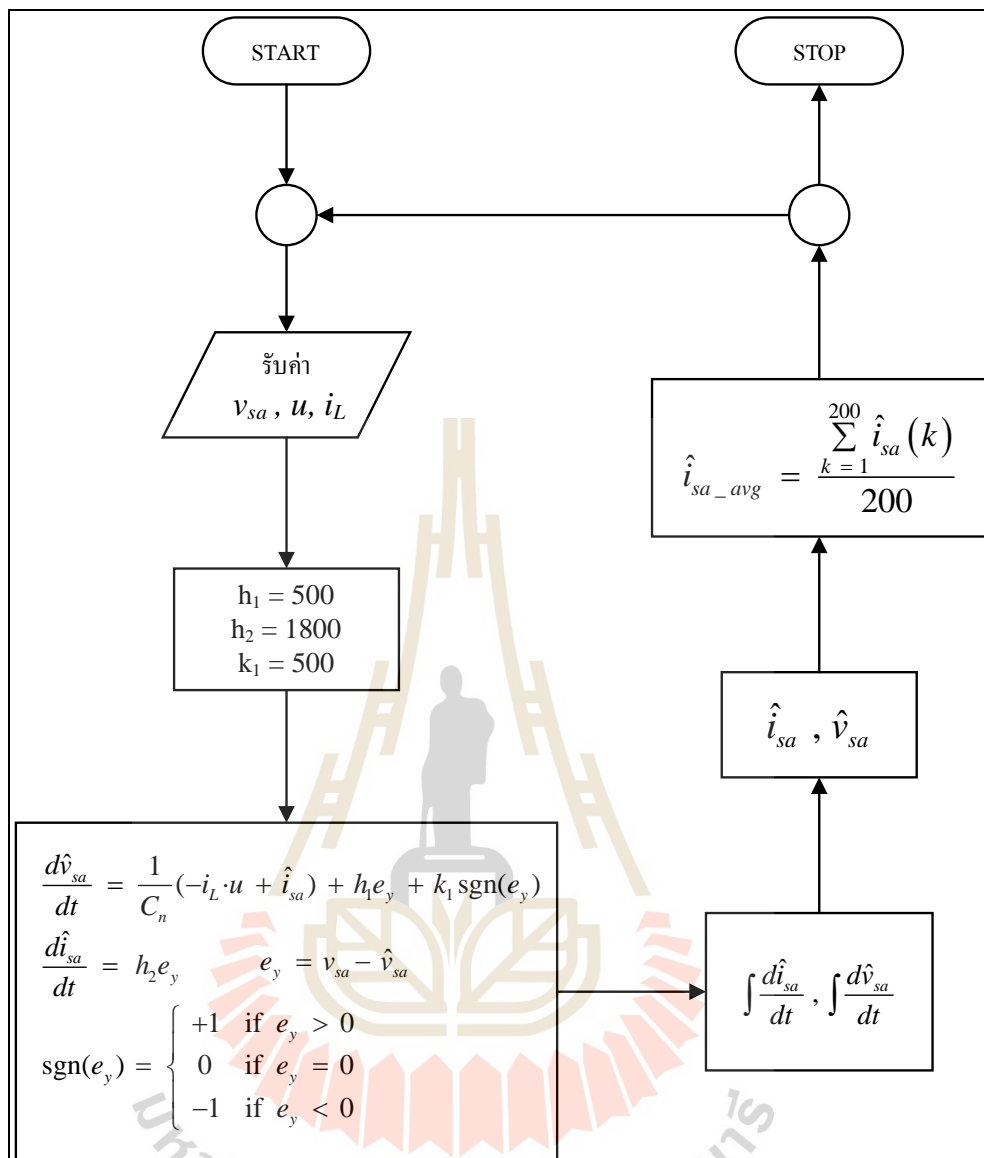
5.3.1 ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อน อันดับหนึ่ง

ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แผนการควบคุม และ ผังงานของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ใน รูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.11 ตามลำดับ เมื่อตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับ ค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f = 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุไม่มีการเบี่ยงเบนของค่า ความจุ ($\Delta C = 0$) ตัวสังเกตสถานะมี $C_n = 1000 \mu\text{F}$ และอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 5.4 ผลการจำลอง สถานการณ์ให้การประมาณค่าและผลตอบสนองดังนี้ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ ได้จากการประมาณค่า (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี ที่ได้จากการวัด (sensor measurement) (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 5.12 แต่การ ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี (i_{sa}) จะมีพลวัตที่ช้ากว่าและมีความพลัว ที่น้อยกว่าความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (actual current) (i_{sa}) ในสถานะอยู่ ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.13 เอ็มพีพีทีใช้ช่วงระยะเวลาช่วงหนึ่งในการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผง พีวี (V_{ref}) ที่ลดลงจากแรงดันเปิด ($V_{oc, PV}$) จนถึงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะ ชั่วครู่ และเอ็มพีพีทีจะทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสลับกันใกล้เคียงกับค่าที่ เหมาะสมในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 5.14 แผงพีวีมี แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (actual voltage) (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิง (voltage reference) ใน สถานะอยู่ตัว แผงพีวีจึงผลิตและจ่ายกำลังงานเฉลี่ย ($P_{sa_avg} = v_{sa_avg} i_{sa_avg}$) ที่ใกล้เคียงกับ กำลังงานมากที่สุด (P_{max}) หรือแผงพีวีมีจุดการทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี แผงพีวีมีแรงดันที่ ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) ที่มีความพลัว และแผงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ที่มี ความพลัวเล็กน้อยในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.15 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ ไหลเข้ากริด (i_T) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 5.16 กริดเอซีจึงได้รับกำลัง งานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานสามารถจ่ายกำลังงาน เฉลี่ยถึงกริดเอซีได้ การใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งแทนที่เซนเซอร์วัด กระแสไฟฟ้าของแผงพีวี จึงมีความเป็นไปได้

เมื่อตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจาก ค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f \neq 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุมีการเบี่ยงเบนของค่า ความจุ ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนมี $C_n = 500 \mu\text{F}$ แต่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ จะได้ว่า $\Delta C = 500 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 5.5 ผล

การจำลองสถานการณ์จะให้การประมาณค่าเฉลี่ยและผลตอบสนองที่เหมือนกับผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ แต่ตัวสังเกตสถานะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่แตกต่างจากการประมาณค่าที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (\hat{i}_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 5.12 แต่การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี (\hat{i}_{sa}) มีความพลัวที่มากกว่าความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.17 เอ็มพีพีทีทำนายค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.18 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) และแผงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.19 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 5.20 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมด การเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีแสดงในตารางที่ 5.6

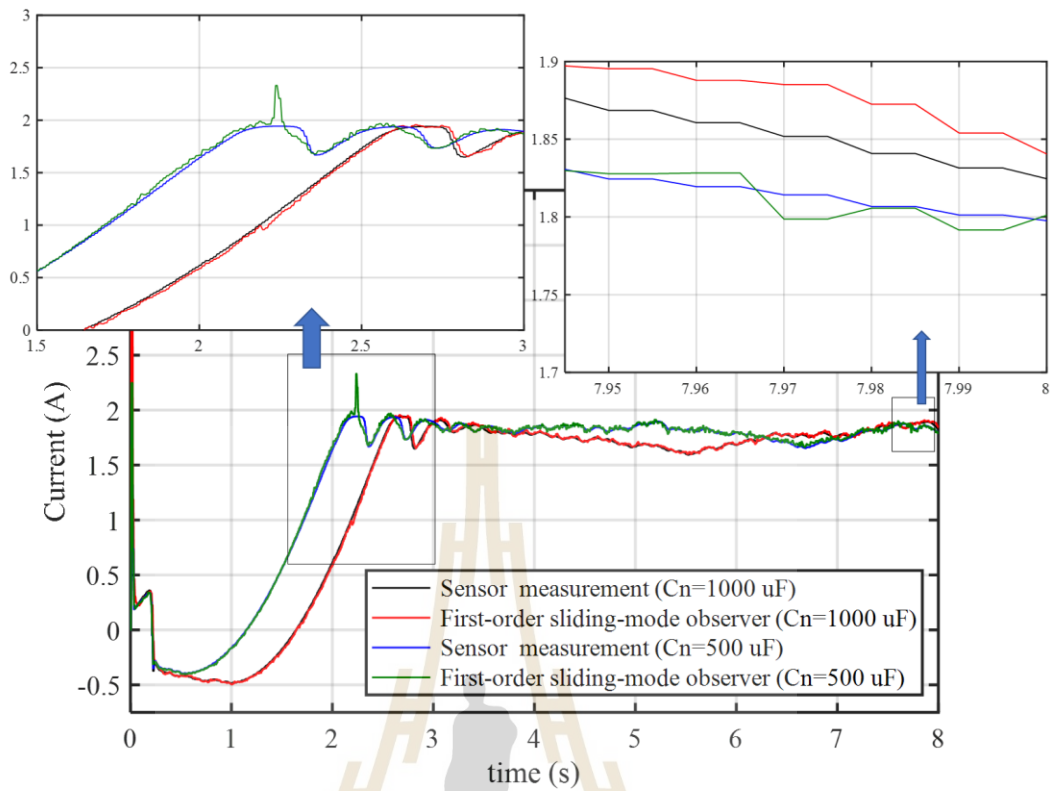




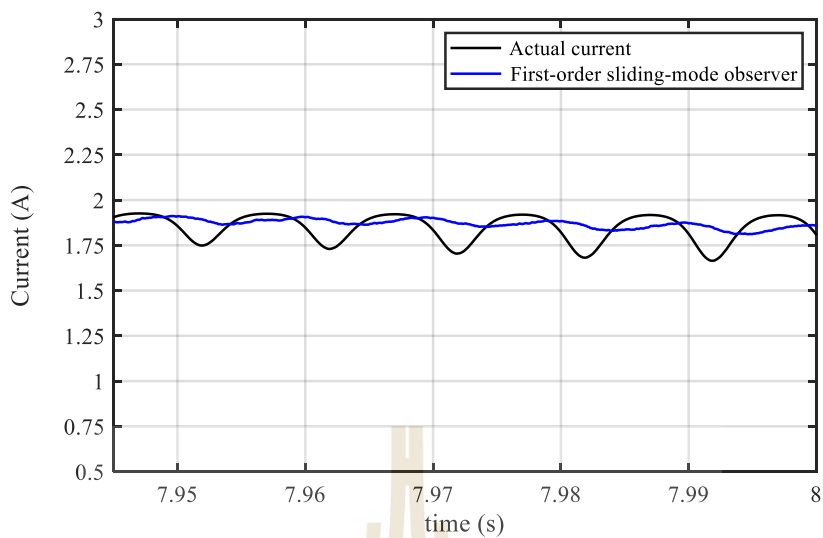
รูปที่ 5.11 ฟังก์ชันของตัวตั้งเกดสถานะโหมคการเลือนอันดับหนึ่งที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

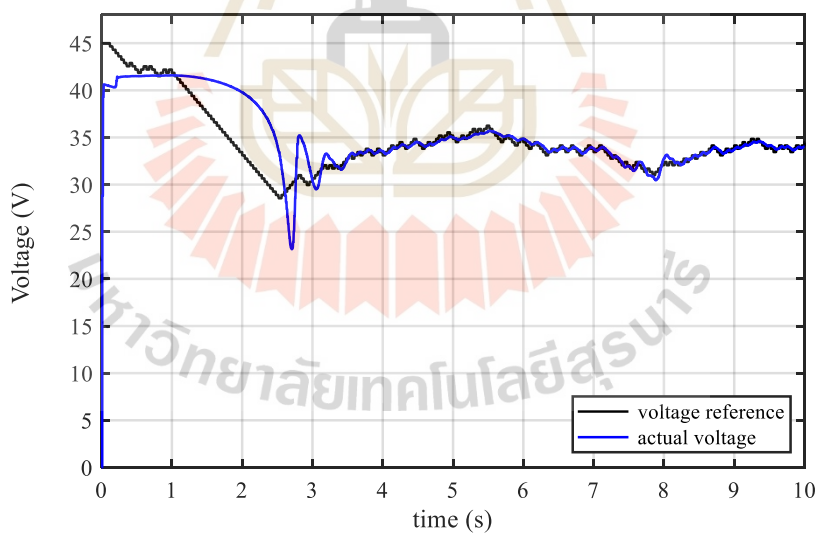
แผงพีวี	ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์	225 W/m ²
	อุณหภูมิของแผงพีวี : T	308 K (25 °C)
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.8 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	33.25 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	10 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	C_n	1000 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำนาย	0.08 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



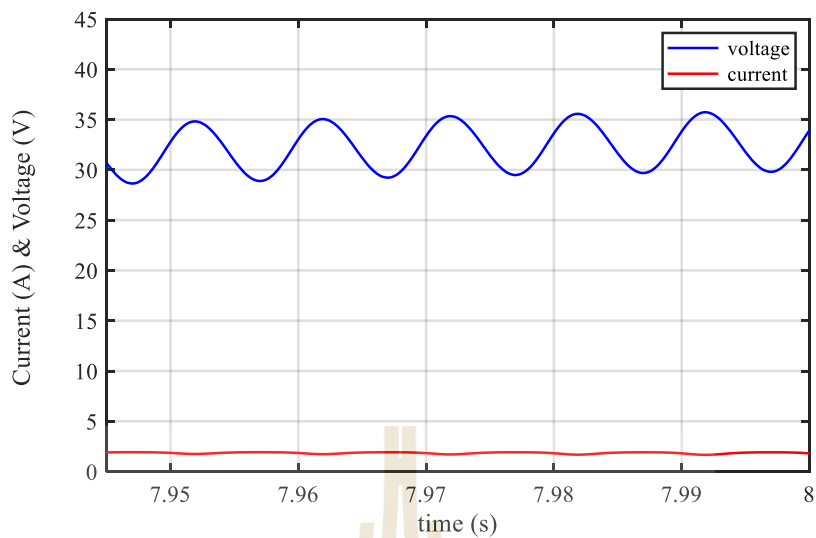
รูปที่ 5.12 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแฉงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์เท่ากัน กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแฉงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีเขียว) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง



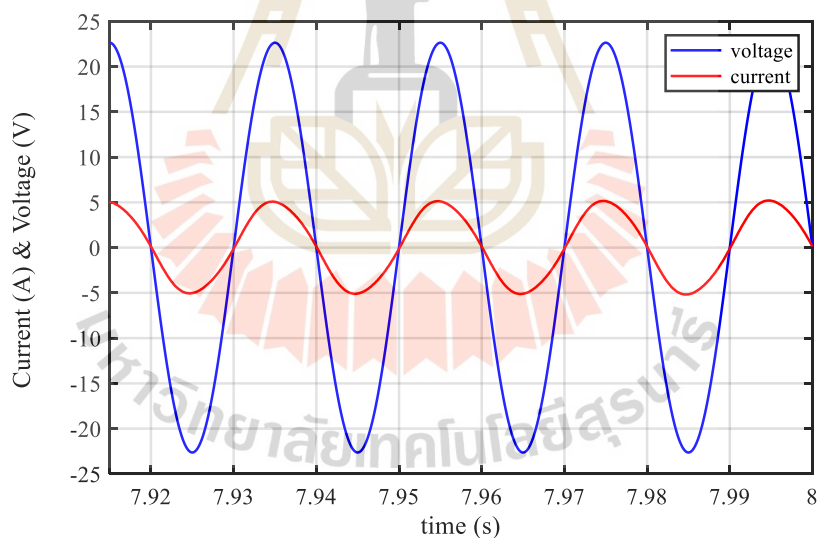
รูปที่ 5.13 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมคการเคลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 5.14 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเคลื่อนอันดับหนึ่ง



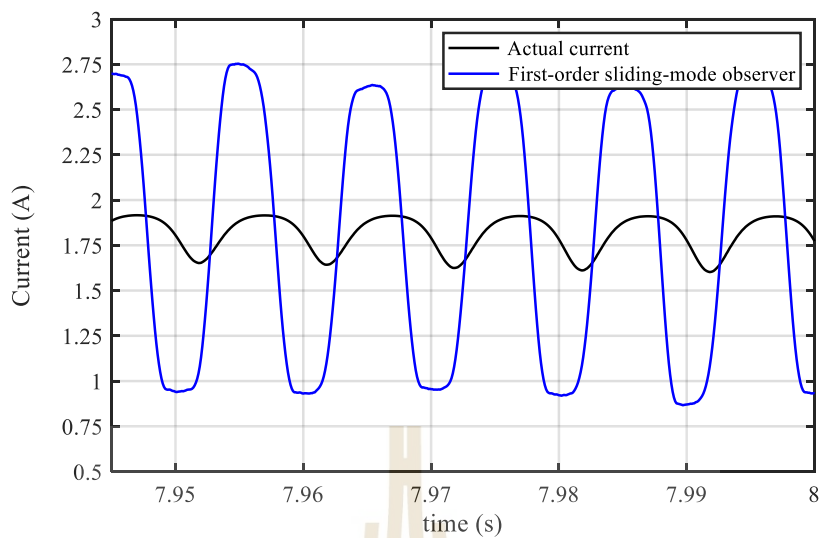
รูปที่ 5.15 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง



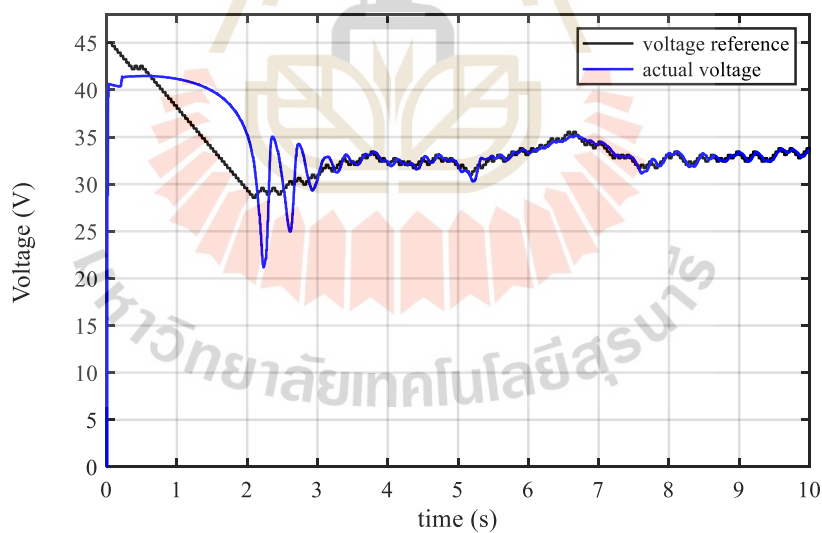
รูปที่ 5.16 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับ
หนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

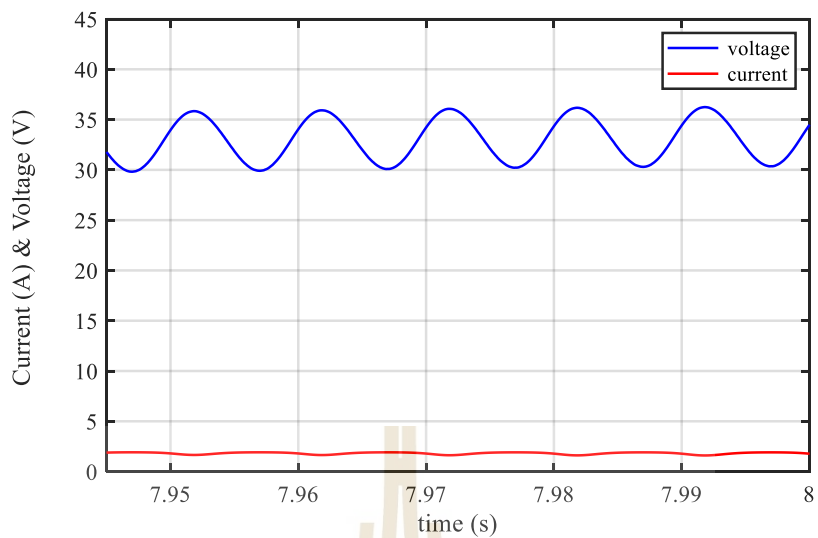
แผงพีวี	ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์	225 W/m ²
	อุณหภูมิของแผงพีวี : T	308 K (25 °C)
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.8 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	33.25 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	10 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมค การเลื่อนอันดับหนึ่ง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	C_n	500 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำนาย	0.08 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม แรงดันดีซี	K_{pv}	0.1
	K_{lv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม กระแสไฟฟ้ากริด	K_{pi}	100
	K_{li}	10



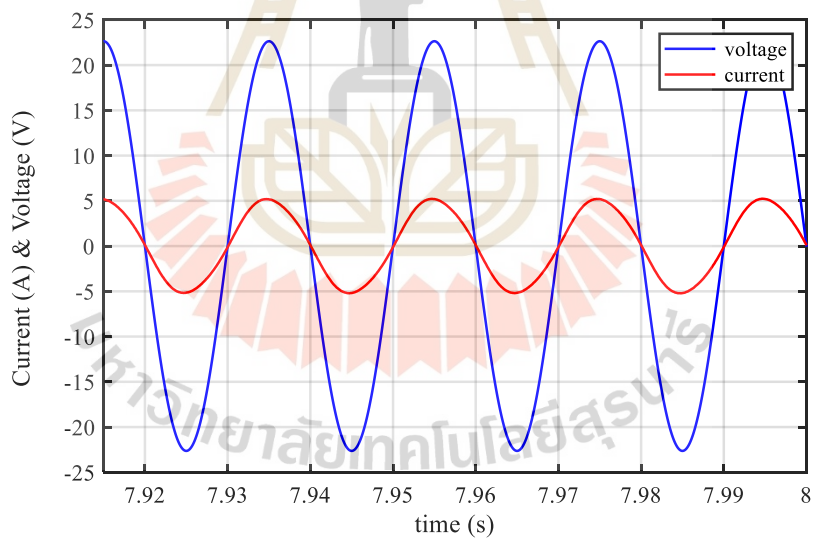
รูปที่ 5.17 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 5.18 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่ง



รูปที่ 5.19 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง



รูปที่ 5.20 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี ในสถานะอยู่ตัว	1.88 A	1.82 A
ขนาดของความพลิวของ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลออกจากแผงพีวี	0.03 A	0.87 A
แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม แผงพีวีในสถานะอยู่ตัว	32.8 V	32.6 V
ค่ายอดของแรงดันกริดเอซี	23 V	23 V
ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริด	5 A	5 A

5.3.2 ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสอง

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงได้ในตารางที่ 5.7 ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองมีค่า $h_1 = 500$, $k_1 = 500$, $h_2 = 1800$ และ $k_2 = 500$ เมื่อแทนค่าลงในสมการ $4k_2h_2 > h_1^2 C_n(8k_2 + 9k_1^2 C_n)$ จะได้ว่า

$$4(500)(1800) > (500)^2(1000 \times 10^{-6})((8(500) + 9(500)^2(1000 \times 10^{-6})) \rightarrow$$

$$36 \times 10^5 > (250)(4000 + 2250) \rightarrow 36 \times 10^5 > (250)(6250) \rightarrow$$

$$36 \times 10^5 > 15.625 \times 10^5 \text{ นั่นคือสมการ } 4k_2h_2 > h_1^2 C_n(8k_2 + 9k_1^2 C_n) \text{ เป็นจริง}$$

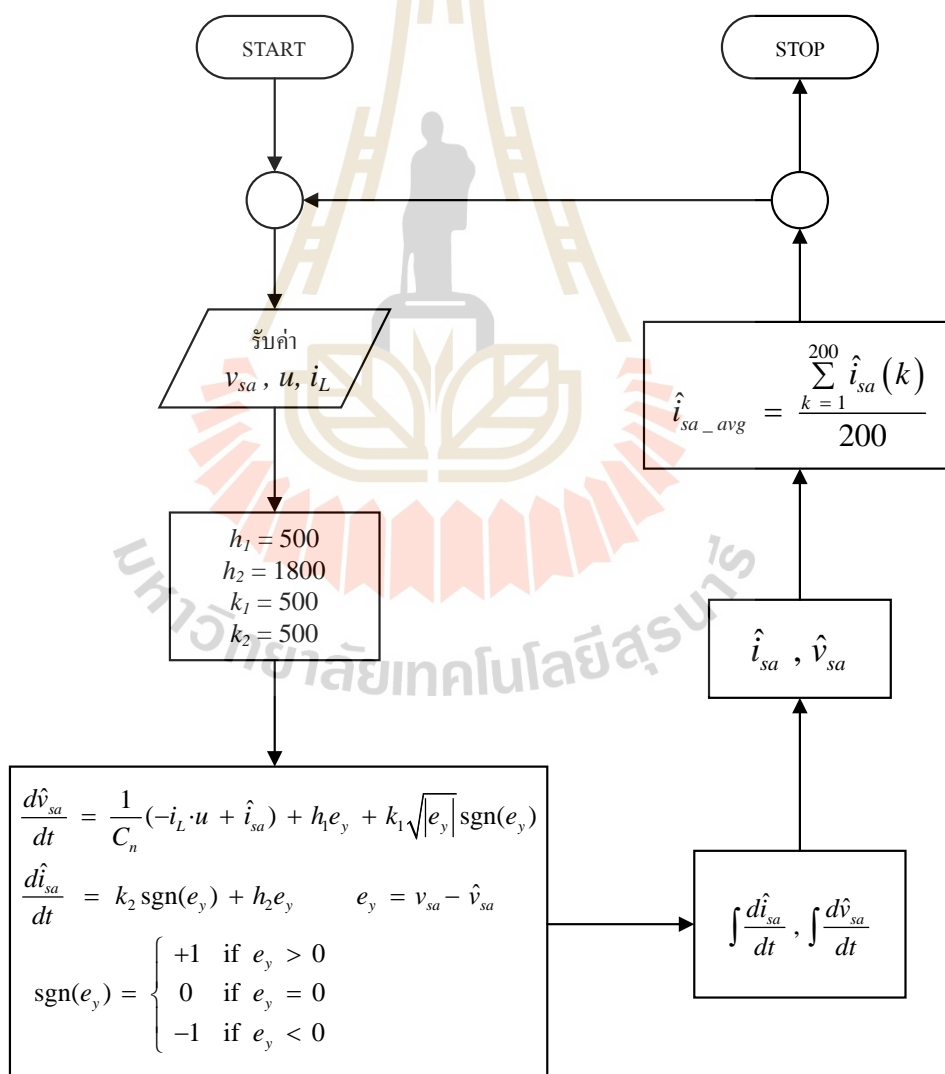
ดังนั้นตัวสังเกตสถานะมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ

ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แผนการควบคุม และฟังก์ชันของตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.21 ตามลำดับ เมื่อตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f = 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุไม่มีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ ($\Delta C = 0$) ตัวสังเกตสถานะมี $C_n = 1000 \mu\text{F}$ และอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 5.7 ผลการจำลองสถานการณ์ให้การประมาณค่าและผลตอบสนองดังนี้ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่า (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (sensor measurement) (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 5.22 แต่การ

ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไม่ไหลออกจากแผงพีวี (i_{sa}) จะติดตามพลวัตและมีความพลัวที่ใกล้เคียงกับความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (actual current) (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.23 ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองจะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่มีสมรรถนะรวดเร็วกว่าการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง เพราะตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีโครงสร้างที่ชดเชยการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไม่ไหลออกจากแผงพีวี และมีค่าเกน k_2 ที่มากเพียงพอ เอ็มพีพีที่ใช้ช่วงระยะเวลาช่วงหนึ่งในการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี (V_{ref}) ที่ลดลงจากแรงดันเปิด ($V_{oc, PV}$) จนถึงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะชั่วคราว และเอ็มพีพีก็จะทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสลับกันใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 5.24 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (actual voltage) (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิง (voltage reference) ในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีจึงผลิตและจ่ายกำลังงานเฉลี่ย ($P_{sa_avg} = v_{sa_avg} i_{sa_avg}$) ที่ใกล้เคียงกับกำลังงานมากที่สุด (P_{max}) หรือแผงพีวีมีจุดการทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี แผงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) ที่มีความพลัวและแผงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไม่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ที่มีความพลัวเล็กน้อยในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.25 แรงดันกริดเอซี (e_g) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 5.26 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานสามารถจ่ายกำลังงานเฉลี่ยถึงกริดเอซีได้ การใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี จึงมีความเป็นไปได้

เมื่อตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f \neq 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุการเบี่ยงเบนของค่าความจุ ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนมี $C_n = 500 \mu\text{F}$ แต่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ จะได้ว่า $\Delta C = 500 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงได้ในตารางที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์จะให้การประมาณค่าเฉลี่ยและผลตอบสนองที่เหมือนกับผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ แต่ตัวสังเกตสถานะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่แตกต่างจากการประมาณค่าที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงได้ในรูปที่ 5.22 แต่การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไม่ไหลออกจากแผงพีวี (i_{sa}) มีความพลัวที่มากกว่าความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.27 ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความพลัวที่มากกว่าความพลัวของการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง เพราะตัว

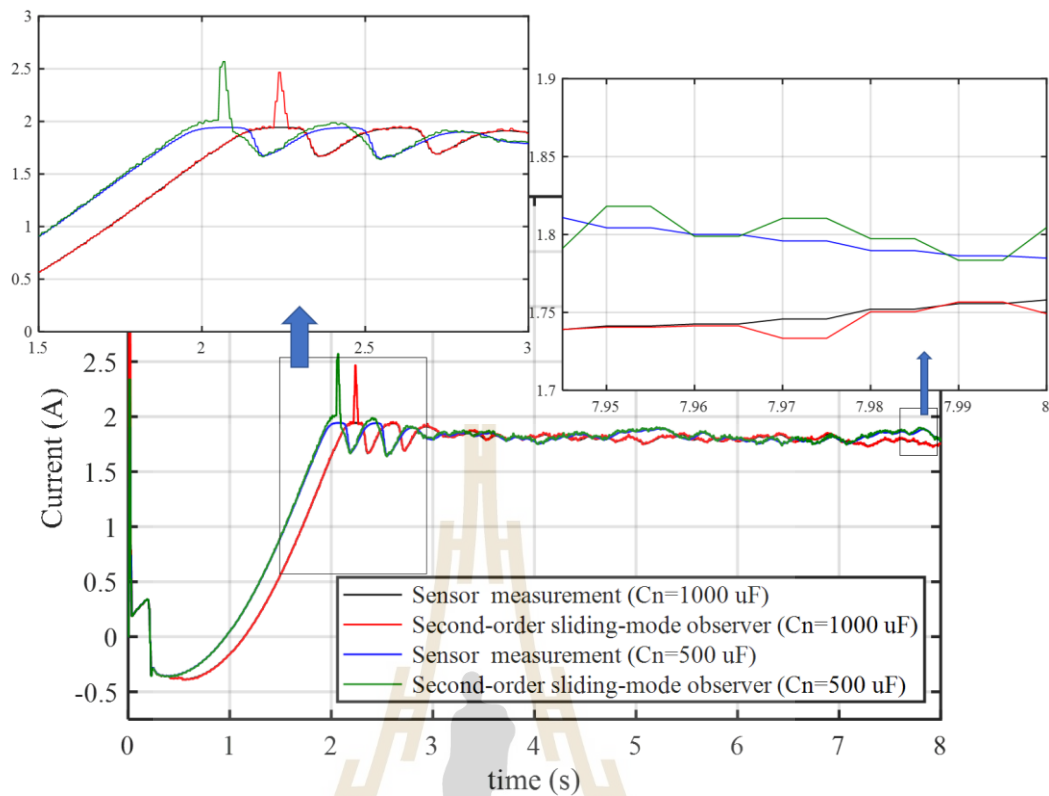
สังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีสมรรถนะของการประมาณค่าที่รวดเร็วกว่า เอ็มพีพีที่ ทำนายค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.28 แผลงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว แผลงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) และแผลงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ในสถานะ อยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.29 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (i_L) มีมุมเฟส ตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 5.30 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผลงพีวี ตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมด การเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี แสดงในตารางที่ 5.9



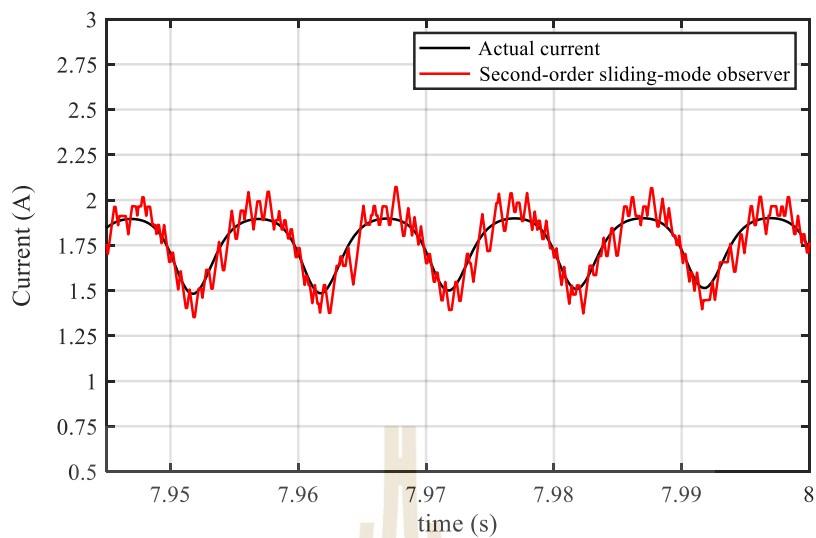
รูปที่ 5.21 ฝั่งงานของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

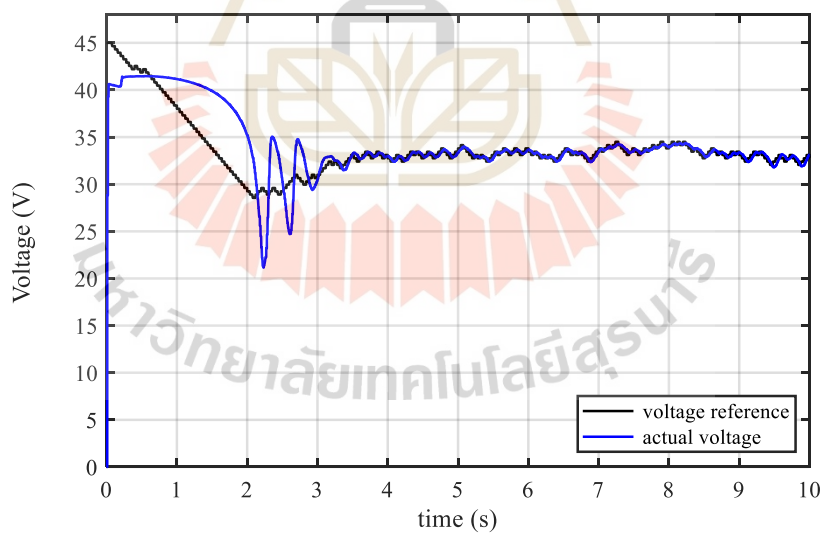
แผงพีวี	ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์	225 W/m ²
	อุณหภูมิของแผงพีวี : T	308 K (25 °C)
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.79 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	33.25 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	10 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมด การเลื่อนอันดับสอง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	k_2	500
	C_n	1000 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำงาน	0.08 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม แรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม กระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



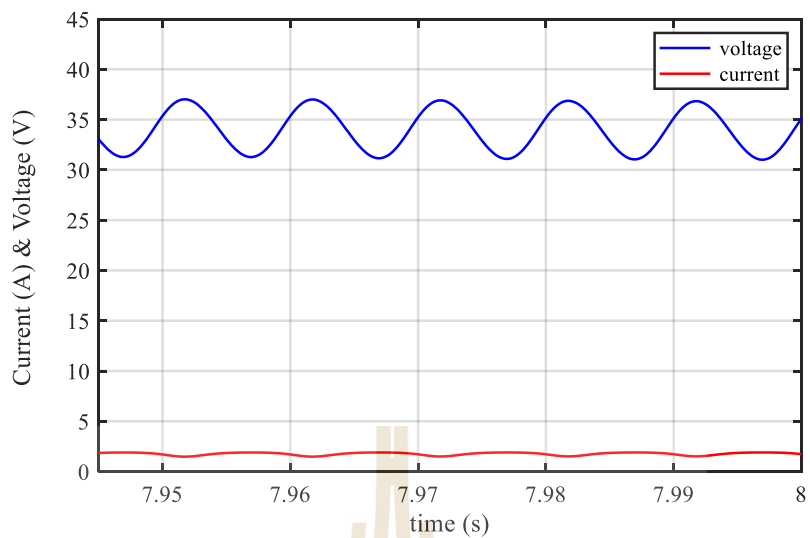
รูปที่ 5.22 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวที่ได้อาจการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์เท่ากัน กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวที่ได้อาจการวัด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีเขียว) ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง



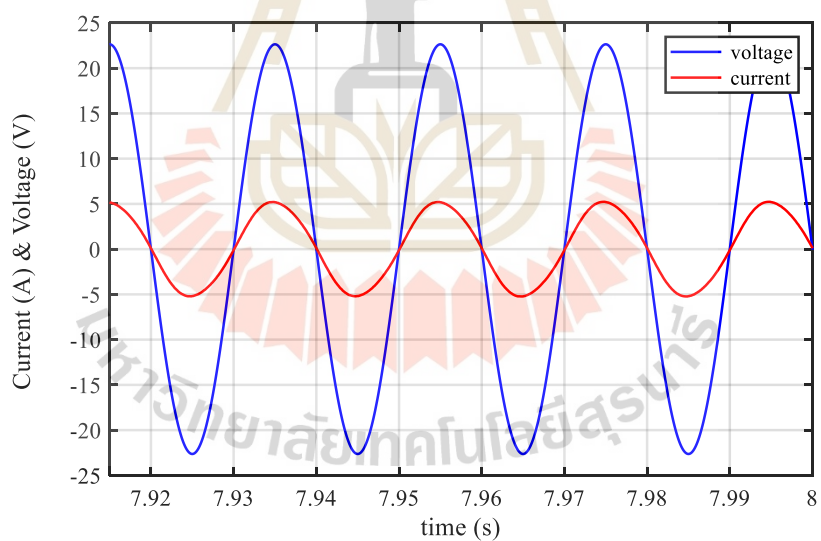
รูปที่ 5.23 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 5.24 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง



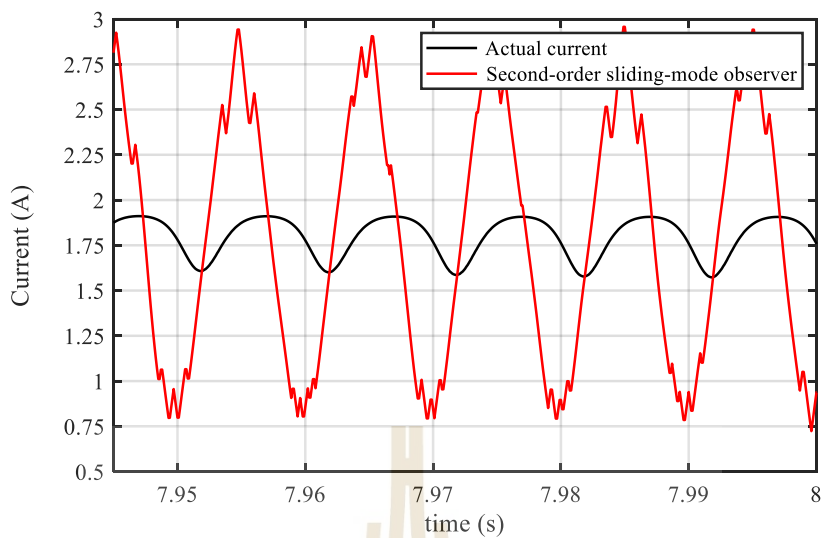
รูปที่ 5.25 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวถังเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง



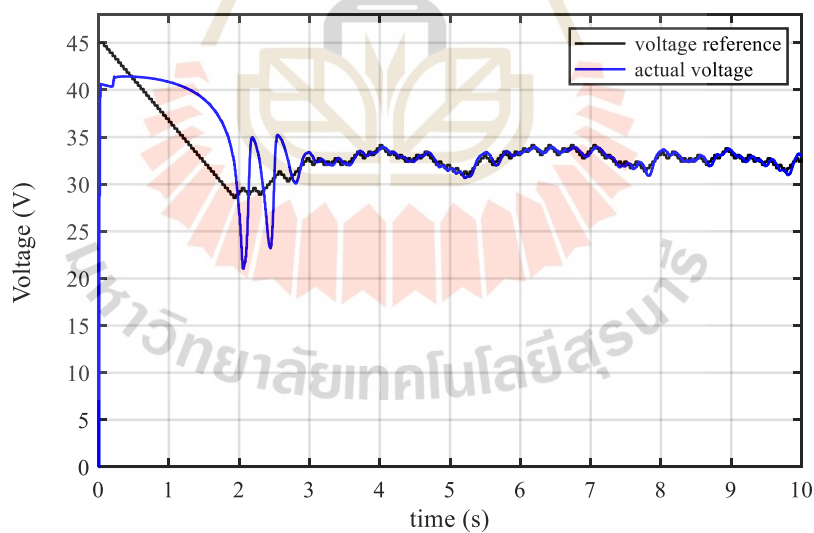
รูปที่ 5.26 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวถังเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

ตารางที่ 5.8 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

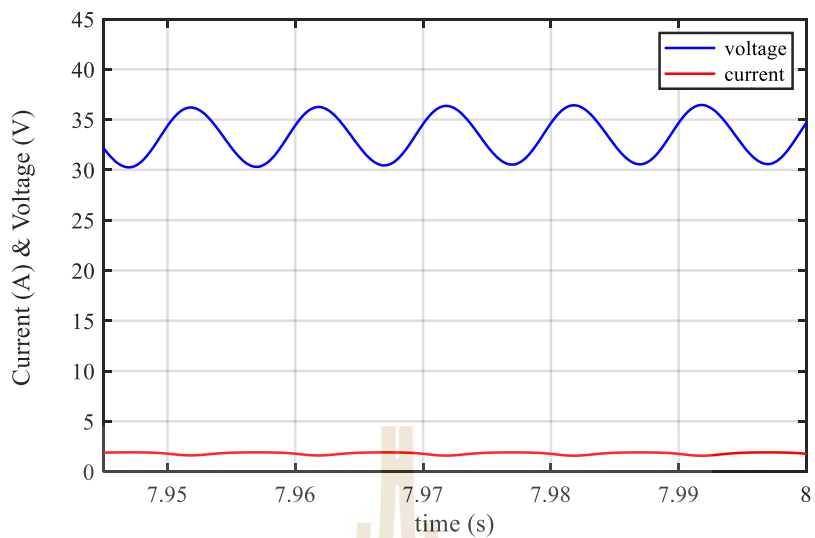
แผงพีวี	ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์	225 W/m ²
	อุณหภูมิของแผงพีวี : T	308 K (25 °C)
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.79 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	33.25 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	10 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมค การเลื่อนอันดับสอง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	k_2	500
	C_n	500 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำนาย	0.08 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม แรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม กระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



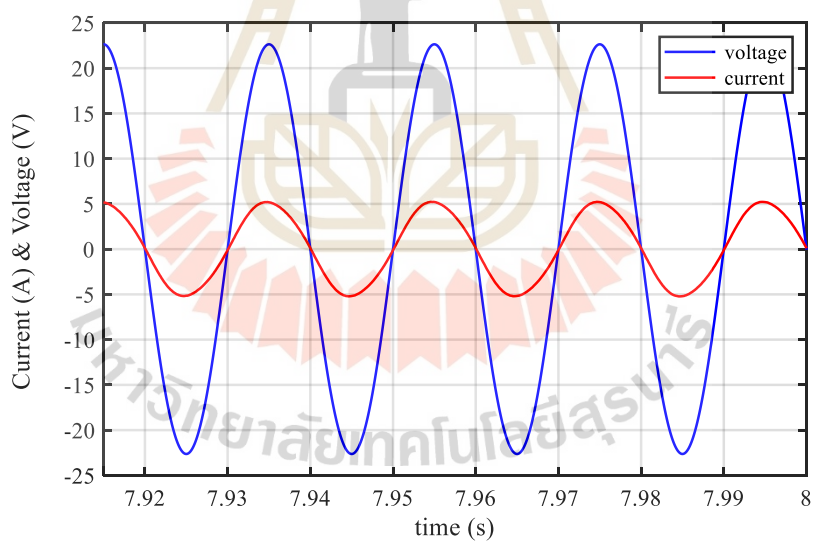
รูปที่ 5.27 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 5.28 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง



รูปที่ 5.29 แรงดันที่ตกคร่อมแผงฟิว (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงฟิว (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวถังเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

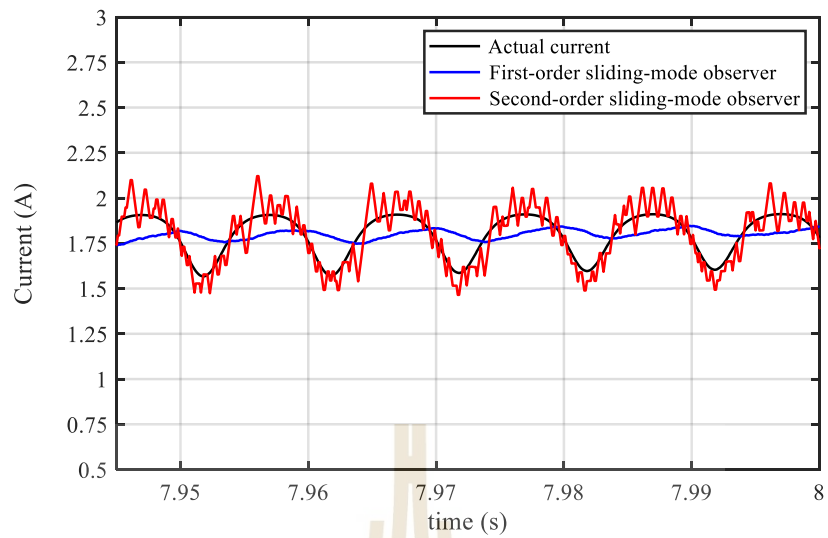


รูปที่ 5.30 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวถังเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

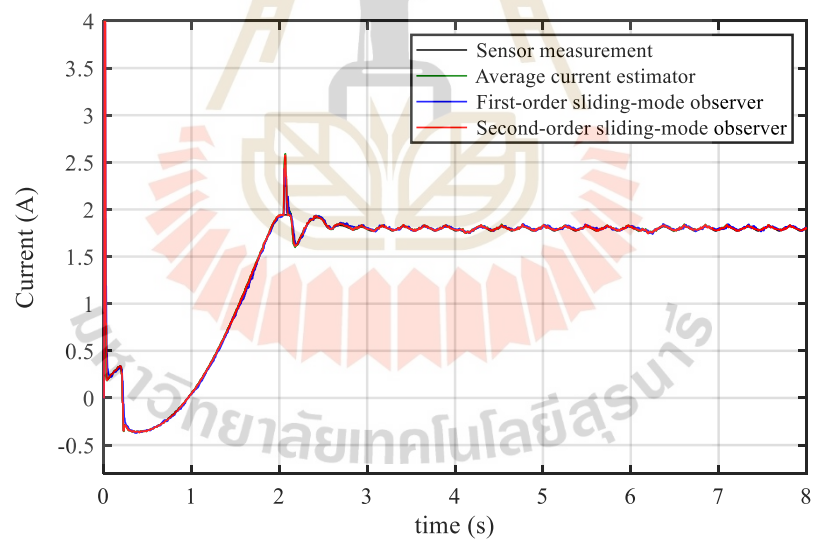
ตารางที่ 5.9 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี ในสถานะอยู่ตัว	1.75 A	1.8 A
ขนาดของความพลั่วของ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลออกจากแผงพีวี	0.4 A	1.12 A
แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม แผงพีวีในสถานะอยู่ตัว	34 V	33.8 V
ค่ายอดของแรงดันกริดเอซี	23 V	23 V
ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริด	5 A	5 A

เมื่อตัวสังเกตสถานะมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีเฟสเดียว เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีใช้งานแทนที่ตัวสังเกตสถานะ และเอ็มพีพีทีได้รับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองจะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่มีสมรรถนะที่ติดตามกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (actual current) ในสถานะอยู่ตัว แต่กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่ามีการแกว่งหรือสั่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของความพลั่ว และตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับหนึ่งประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความพลั่วต่ำกว่าความพลั่วของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.31 เมื่อเอ็มพีพีทีได้รับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่เกิดจากการวัด (sensor measurement) แทนที่กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดจากการคำนวณโดยตรงและแทนที่ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการประมาณค่า หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ติดตามค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่เกิดจากการวัดในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และตัวสังเกตสถานะให้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ติดตามค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่เกิดจากการวัดเช่นเดียวกันที่แสดงในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.31 กระแสไฟฟ้าของแผงฟิวด์ที่เกิดจากการวัดและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการประมาณค่าในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงฟิวด์ที่เกิดจากการวัด กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดจากการคำนวณ โดยตรง และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการประมาณค่า

5.4 สรุป

ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงความเป็นได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เมื่อหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีเฟสเดียว ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและกระแสไฟฟ้ากริด และให้การประมาณค่าเฉลี่ยหรือการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญหรือมีความแตกต่างน้อยในสถานะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าและการคำนวณจะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด แต่กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่ามีความพลั่วที่แทบไม่มีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีและผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิด เอ็มพีพีที่ทำนายค่าหรือสร้างแรงดันอ้างอิงที่ใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงที่ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานตรงกับจุดเอ็มพีพีในสถานะอยู่ตัว และแผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดซิงโครไนซ์กับแรงดันกริดเอซี และแผงพีวีผลิตและจ่ายกำลังงานไฟฟ้าถึงกริดเอซี

บทที่ 6

ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์

6.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีภาคเดียวเฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชอี ที่ทดลองโดยใช้ชุดฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวที่มีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี ทดลองชุดฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งแทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี และทดลองชุดฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี ผลการทดลองในทุกกรณีจะแสดงถึงการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวีที่มีจุดการทำงานใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี (แรงดันอ้างอิงที่เหมาะสม) ในสถานะอยู่ตัว และเปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิงและแรงดันดีซีเฉลี่ยที่ตกคร่อมแผงพีวี ผลการทดลองในทุกกรณีจะแสดงถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดที่ซิงโครไนซ์กับแรงดันกริดเอชอี และเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวี และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าและการคำนวณ การทดลองจะพิจารณาถึงหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตสถานะที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ตหรืออินเวอร์เตอร์พีวีเฟสเดียว

6.2 ผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

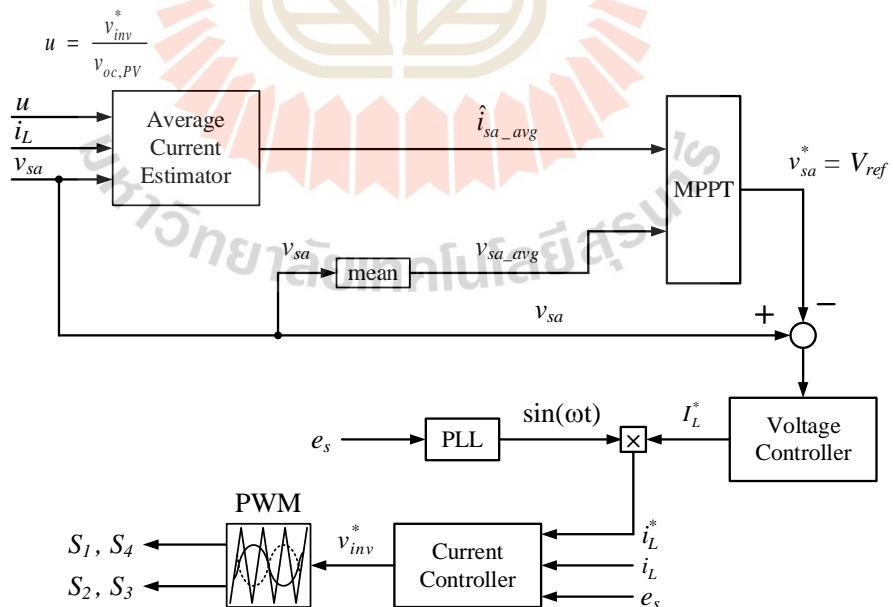
ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แผนการควบคุม และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลอง จะแสดงได้ในรูปที่ 6.1, 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ เมื่อหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f = 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุไม่มีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ ($\Delta C = 0$) หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมี $C_n = 1000 \mu\text{F}$ และอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 6.1 ผลการทดลองให้การประมาณค่าและผลตอบสนองดังนี้ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวี (\hat{i}_{sa_avg}) (average current estimator) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (sensor measurement) (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 6.4 เอ็มพีพีพีที่ใช้ช่วงระยะเวลา

ช่วงหนึ่งในการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี (V_{ref}) ที่ลดลงจากแรงดันเปิด ($V_{oc, PV}$) จนถึงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะชั่วคราว และเอ็มพีพีทีที่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสลับกันใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 6.5 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (actual voltage) (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิง (voltage reference) ในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีจึงผลิตและจ่ายกำลังงานเฉลี่ย ($P_{sa_avg} = v_{sa_avg}i_{sa_avg}$) ที่ใกล้เคียงกับกำลังงานมากที่สุด (P_{max}) หรือแผงพีวีมีจุดการทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี แผงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) ที่มีความพลัว และแผงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ที่มีความพลัวเล็กน้อยในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.6 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 6.7 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานสามารถจ่ายกำลังงานเฉลี่ยถึงกริดเอซีได้ การใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี จึงมีความเป็นไปได้

เมื่อหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f \neq 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุมีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมี $C_n = 500 \mu\text{F}$ แต่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ จะได้ว่า $\Delta C = 500 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 6.2 ผลการทดลองจะให้การประมาณค่าและผลตอบสนองที่เหมือนกับผลการทดลองสถานการณ์ที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวี (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 6.8 เอ็มพีพีทีที่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี (V_{ref}) ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 6.9 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) และมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.10 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.11 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีแสดงในตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.1 ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เทียมเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6.2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้ในการทดลอง ที่มีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยตรง

```

// Average Current Estimator

if (count == 0){
    Vsa_k = Vdc;
}
if (count < 200) {
    Sum_A = Sum_A + Iac*u;
    count = count + 1;
}
else if (count == 200){
    Sum_B = Sum_A/200;
    Vsa_k1 = Vdc - Vsa_k;
    Sum_C = (Cn*Vsa_k1)/0.01;
    Sum_A = 0;
    count = 0;
}
Idc_est_avg = Sum_B + Sum_C;
}

// if Period MPPT = 80 ms , must change 200 to 1600
// because 200 use Period MPPT = 10 ms

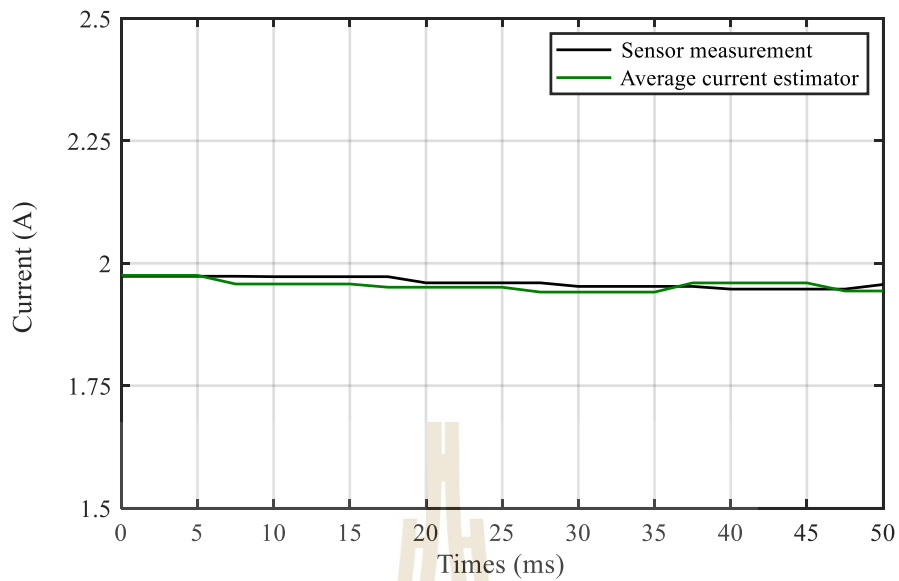
if (MPPT_count == 0){
    Vpv_k1 = Vdc_avg; // Vpv_k1 = Vdc_ref;
    Ppv_k1 = Vdc_avg * Idc_est_avg; // Ppv_k1 = Ppv_k; Idc_est_avg
    MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if (MPPT_count < 800) {
    MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if (MPPT_count == 800){
    Vpv_k = Vdc_avg; // Idc_est_avg , Idc_avg
    Ppv_k = Vdc_avg * Idc_est_avg;
    if ((Ppv_k - Ppv_k1)>0) { sgn_Ppv = 1; }
    else if ((Ppv_k - Ppv_k1)<0) { sgn_Ppv = -1; }
    else { sgn_Ppv = 0; }
    if ((Vpv_k - Vpv_k1)>0) { sgn_Vpv = 1; }
    else if ((Vpv_k - Vpv_k1)<0) { sgn_Vpv = -1; }
    else { sgn_Vpv = 0; }
    Vdc_k = Vpv_k1 + 0.35*sgn_Ppv*sgn_Vpv;
    Vdc_ref = Vdc_k;
    if (Vdc_ref > 37) {Vdc_ref = 37;}
    if (Vdc_ref < 26) {Vdc_ref = 26;}
    MPPT_count = 0;
}
}

```

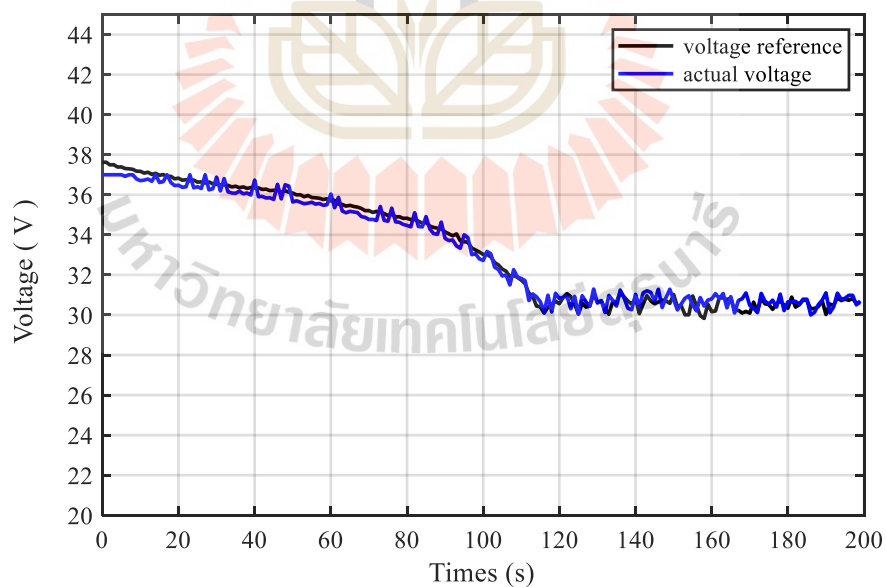
รูปที่ 6.3 หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง

แผงพีวี	ความเข้มแสง (irradiance)	33500 lx
	กำลังงานมากที่สุด : T	60.08 W
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.94 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	30.97 V
	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	2.6 A
	แรงดันวงจรเปิด (V_{oc})	38 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	C_n	1000 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำงาน	0.04 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



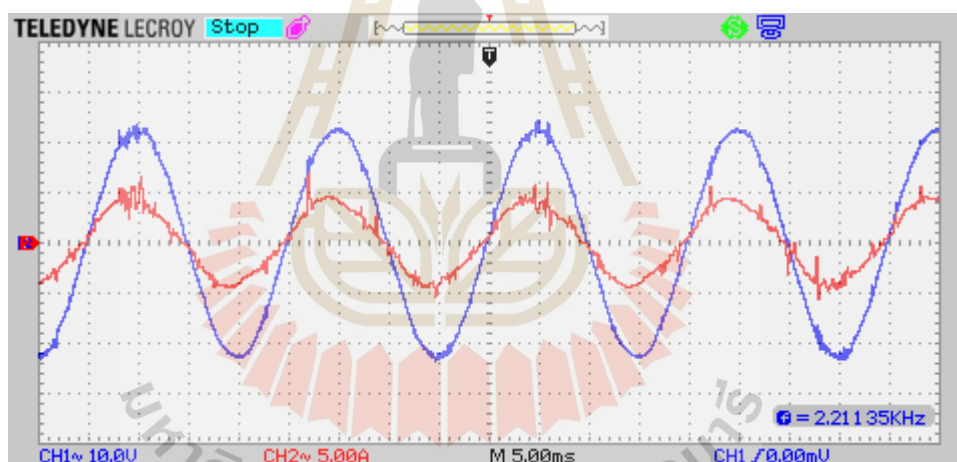
รูปที่ 6.4 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีเขียว) ของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 6.5 แรงดันเฉลี่ยตลอดแผงฟิวที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



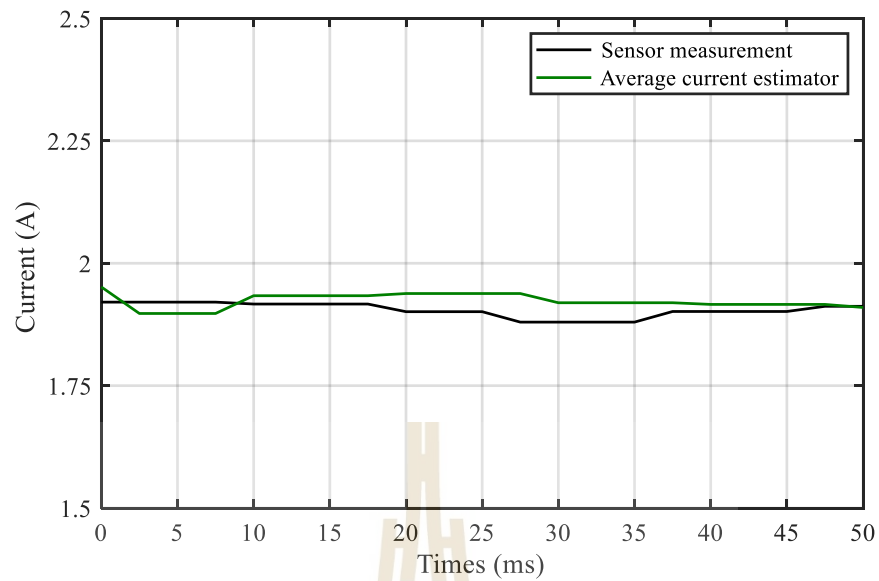
รูปที่ 6.6 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



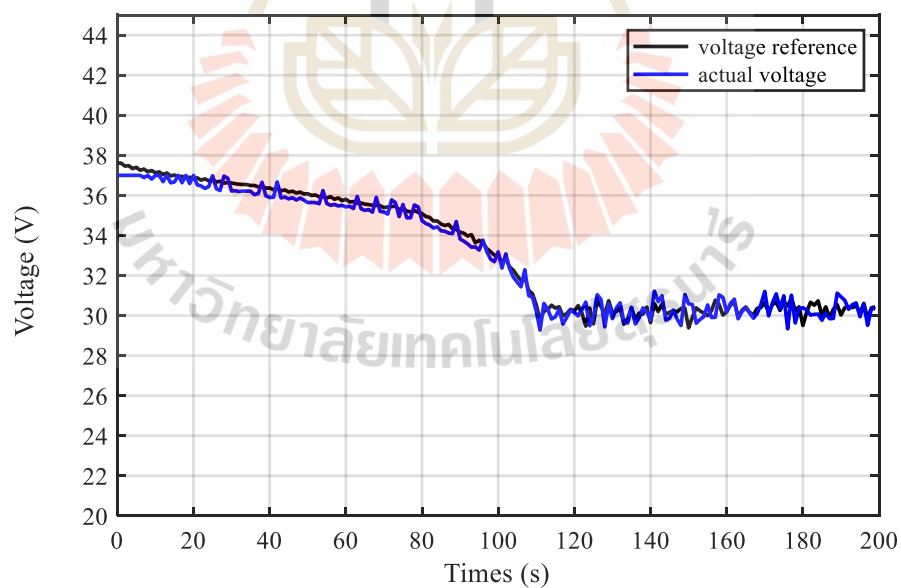
รูปที่ 6.7 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง

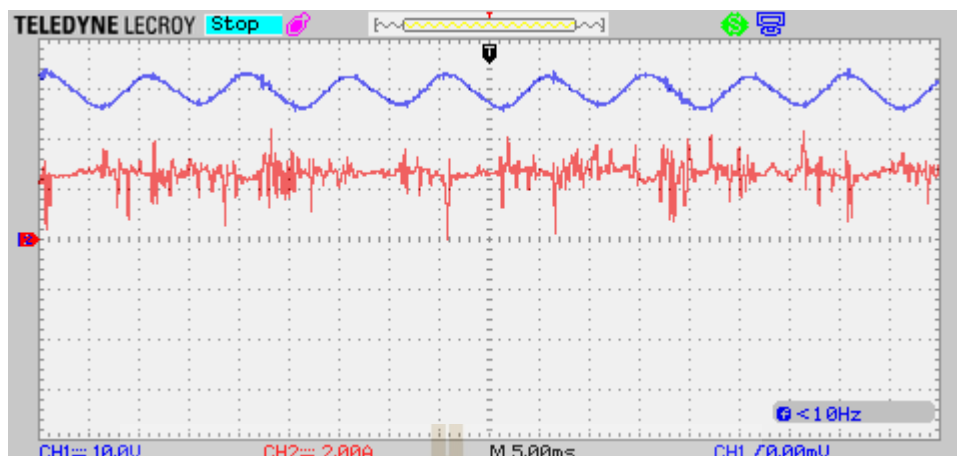
แผงพีวี	ความเข้มแสง (irradiance)	33500 lx
	กำลังงานมากที่สุด : T	60.08 W
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.94 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	30.97 V
	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	2.6 A
	แรงดันวงจรเปิด (V_{oc})	38 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย	C_n	500 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำงาน	0.04 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{pv}	0.1
	K_{lv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{pi}	100
	K_{li}	10



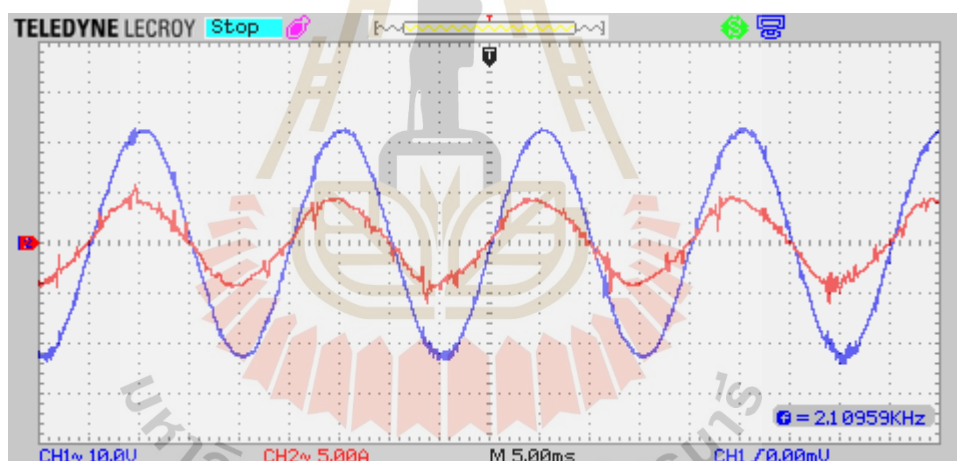
รูปที่ 6.8 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงฟิวที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (สีเขียว) ของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 6.9 แรงดันเฉลี่ยต่อคร่อมแผงฟิวที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 6.10 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 6.11 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี ในสถานะอยู่ตัว	1.94 A	1.91 A
แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม แผงพีวีในสถานะอยู่ตัว	30.66 V	30.61 V
ค่ายอดของแรงดันกริดเอซี	23 V	23 V
ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริด	4.5 A	4.5 A

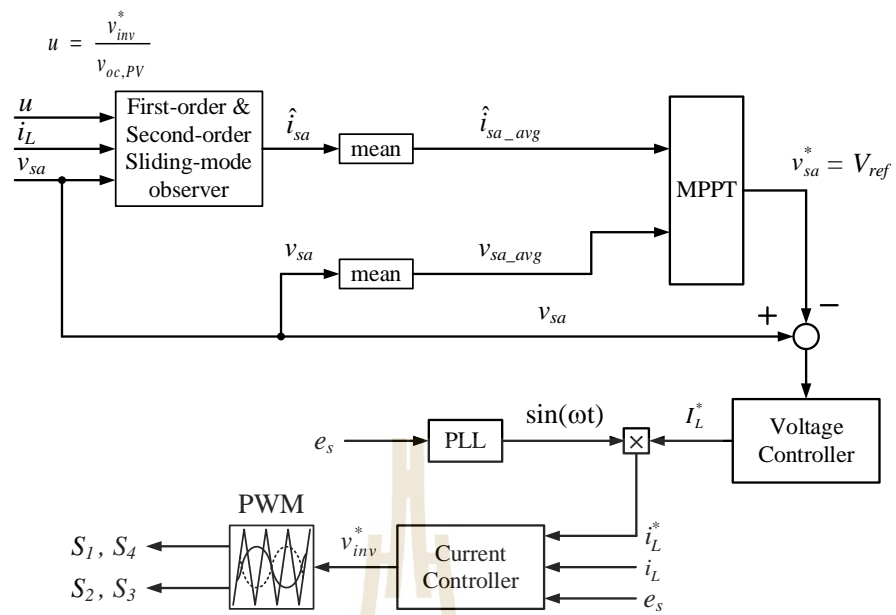
6.3 ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์ที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อน

6.3.1 ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์ที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง

ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แผนการควบคุม และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง แสดงได้ในรูปที่ 6.1, 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ เมื่อตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f = 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุไม่มีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ ($\Delta C = 0$) ตัวสังเกตสถานะมี $C_n = 1000 \mu\text{F}$ และอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 6.4 ผลการทดลองให้การประมาณค่าและผลตอบสนองดังนี้ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่า (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (sensor measurement) (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 6.14 แต่การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี (i_{sa}) จะมีพลวัตที่ช้ากว่าและมีความพลัวที่น้อยกว่าความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (actual current) (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.15 เอ็มพีพีทีในช่วงระยะเวลาช่วงหนึ่งในการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแผงพีวี (V_{ref}) ที่ลดลงจากแรงดันเปิด ($V_{oc, PV}$) จนถึงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะชั่วคราว และเอ็มพีพีทีจะทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสลับกันใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 6.16 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (actual voltage) (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิง (voltage reference) ในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีจึงผลิตและจ่ายกำลังงานเฉลี่ย ($P_{sa_avg} = v_{sa_avg} i_{sa_avg}$) ที่ใกล้เคียงกับกำลังงานมากที่สุด (P_{max}) หรือ

แรงแม่เหล็กที่ทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี แรงแม่เหล็กที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) ที่มีความพลัว และแรงแม่เหล็กกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ที่มีความพลัวเล็กน้อยในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.17 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 6.18 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแรงแม่เหล็กตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานสามารถจ่ายกำลังงานเฉลี่ยถึงกริดเอซีได้ การใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อนอันดับหนึ่งแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแรงแม่เหล็ก จึงมีความเป็นไปได้

เมื่อตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อนอันดับหนึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f \neq 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุมีการเบี่ยงเบนของความจุ ตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อนมี $C_n = 500 \mu\text{F}$ แต่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ จะได้ว่า $\Delta C = 500 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 6.5 ผลการทดลอง จะให้การประมาณค่าเฉลี่ยและผลตอบสนองที่เหมือนกับผลการทดลองที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ แต่ตัวสังเกตสถานะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแรงแม่เหล็กที่แตกต่างจากการประมาณค่าที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแรงแม่เหล็กที่ได้จากการวัด (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 6.19 แต่การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแรงแม่เหล็ก (i_{sa}) มีความพลัวที่มากกว่าความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.20 เอ็มพีพีที่ทำนายค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.21 แรงแม่เหล็กที่ตกคร่อม (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว แรงแม่เหล็กที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) และแรงแม่เหล็กกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.22 แรงดันกริดเอซี (e_s) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 6.23 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแรงแม่เหล็กตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแสดงดังตารางที่ 6.6



รูปที่ 6.12 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้ในการทดลอง ที่มีตัวสังเกตสถานะ
 ปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี

```

// First order Sliding-mode Observer

Vdc_est_k = Vdc_est_k1 + Ts*(((Idc_est_k1 - Iac*u)/Cn)+(h1*ey) + (k1*sgn_ey));
Idc_est_k = Idc_est_k1 + Ts*(h2*ey);
if (Idc_est_k < 0) { Idc_est_k = 0; }
Vdc_est_k1 = Vdc_est_k;
Idc_est_k1 = Idc_est_k;
}

if (choose == 1 || choose == 2){
  if (Ts_count < 200) {
    Sum_Vdc_est = Sum_Vdc_est + Vdc_est_k;
    Sum_Idc_est = Sum_Idc_est + Idc_est_k;
    Ts_count = Ts_count + 1;
  }
  else if (Ts_count == 200){
    Vdc_est_avg = Sum_Vdc_est/200;
    Idc_est_avg = Sum_Idc_est/200;
    Sum_Vdc_est = 0;
    Sum_Idc_est = 0;
    Ts_count = 0;
  }
}

// Find average Idc and Vdc
if (MPPTin_count < 200) {
  Sum_Vdc = Sum_Vdc + Vdc;
  Sum_Idc = Sum_Idc + Idc;
  MPPTin_count = MPPTin_count + 1;
}
else if (MPPTin_count == 200){
  Vdc_avg = Sum_Vdc/200;
  Idc_avg = Sum_Idc/200;
  Sum_Vdc = 0;
  Sum_Idc = 0;
  MPPTin_count = 0;
}

// if Period MPPT = 80 ms , must change 200 to 1600
// because 200 use Period MPPT = 10 ms

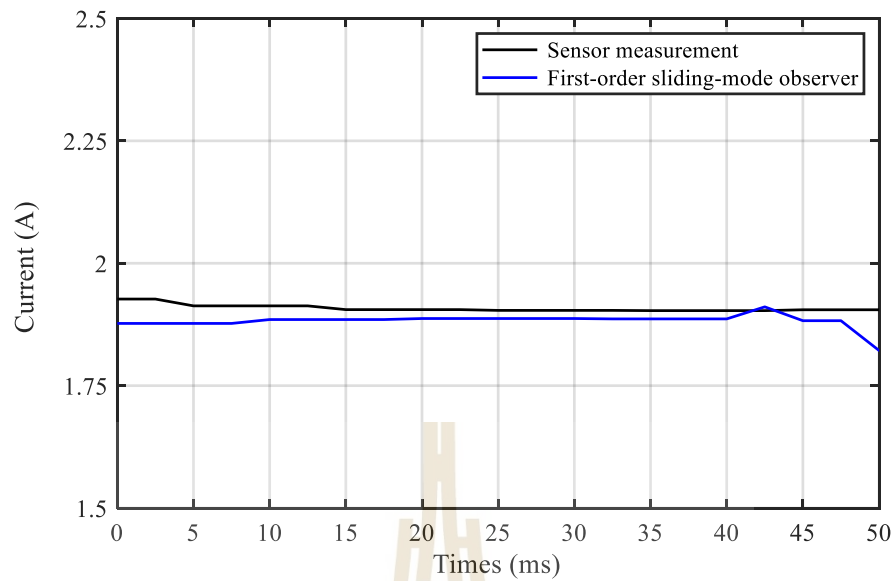
if (MPPT_count == 0){
  Vpv_k1 = Vdc_avg; // Vpv_k1 = Vdc_ref;
  Ppv_k1 = Vdc_avg * Idc_est_avg; // Ppv_k1 = Ppv_k; Idc_est_avg
  MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if (MPPT_count < 800){
  MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if (MPPT_count == 800){
  Vpv_k = Vdc_avg;
  Ppv_k = Vdc_avg * Idc_est_avg; // Idc_est_avg , Idc_avg
  if ((Ppv_k - Ppv_k1)>0) { sgn_Ppv = 1; }
  else if ((Ppv_k - Ppv_k1)<0) { sgn_Ppv = -1; }
  else { sgn_Ppv = 0; }
  if ((Vpv_k - Vpv_k1)>0) { sgn_Vpv = 1; }
  else if ((Vpv_k - Vpv_k1)<0) { sgn_Vpv = -1; }
  else { sgn_Vpv = 0; }
  Vdc_k = Vpv_k1 + 0.35*sgn_Ppv*sgn_Vpv;
  Vdc_ref = Vdc_k;
  if (Vdc_ref > 37) {Vdc_ref = 37;}
  if (Vdc_ref < 28) {Vdc_ref = 28;}
  MPPT_count = 0;
}
}

```

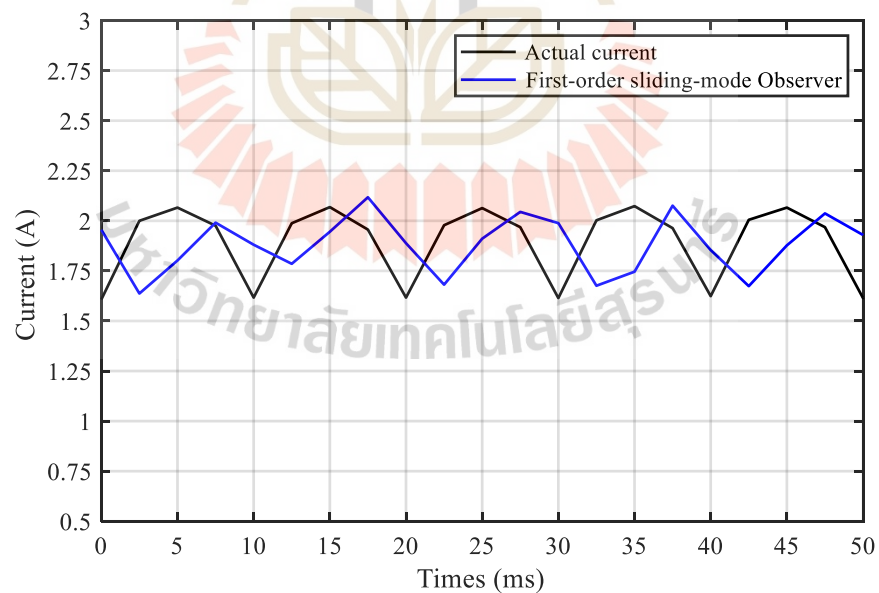
รูปที่ 6.13 ตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง

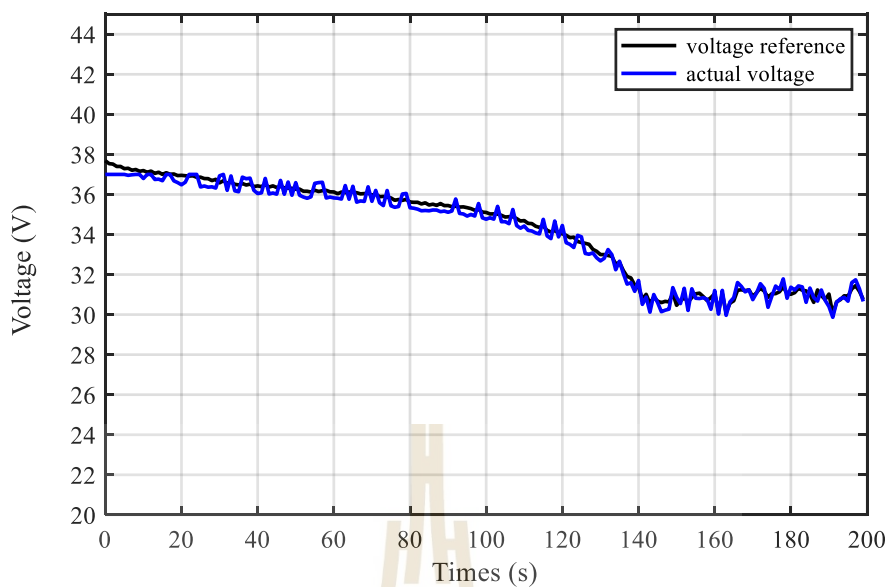
แผงพีวี	ความเข้มแสง (irradiance)	33500 lx
	กำลังงานมากที่สุด : T	60.08 W
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.94 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	30.97 V
	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	2.6 A
	แรงดันวงจรเปิด (V_{oc})	38 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่ง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	C_n	1000 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำนาย	0.04 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



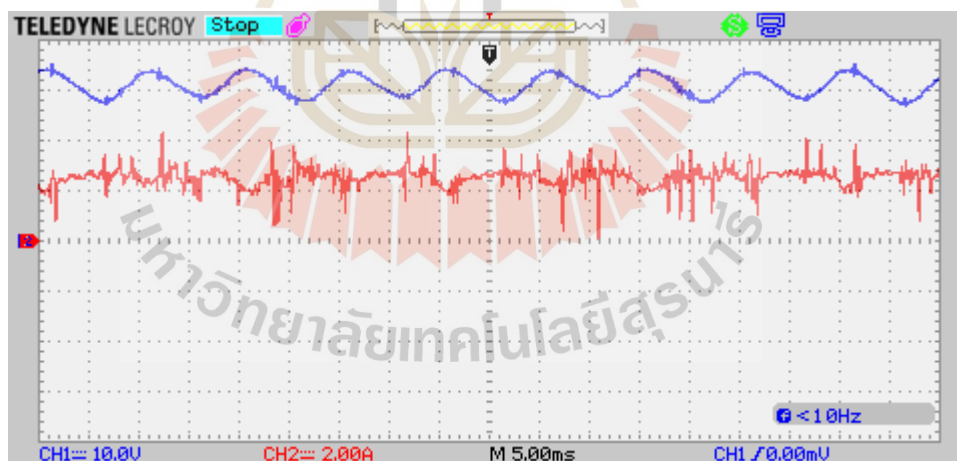
รูปที่ 6.14 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแฉงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมคการเคลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว



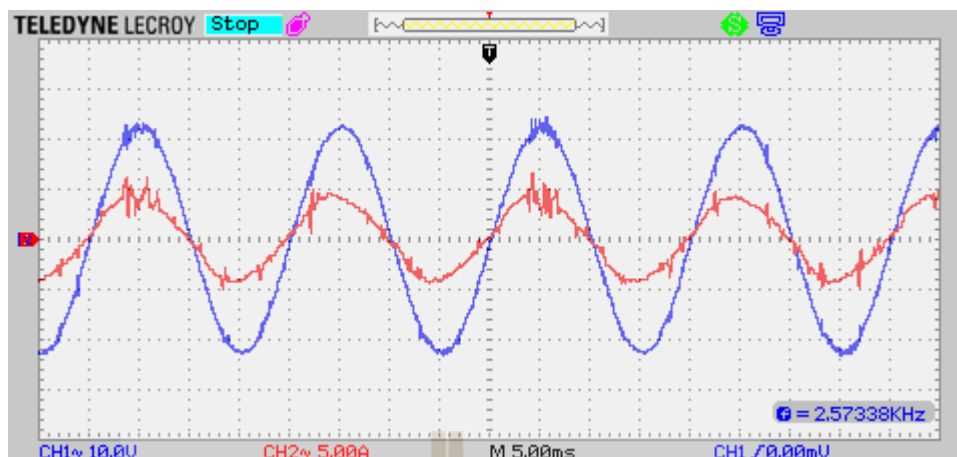
รูปที่ 6.15 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแฉงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของตัวสังเกตสถานะโหมคการเคลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 6.16 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง



รูปที่ 6.17 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง

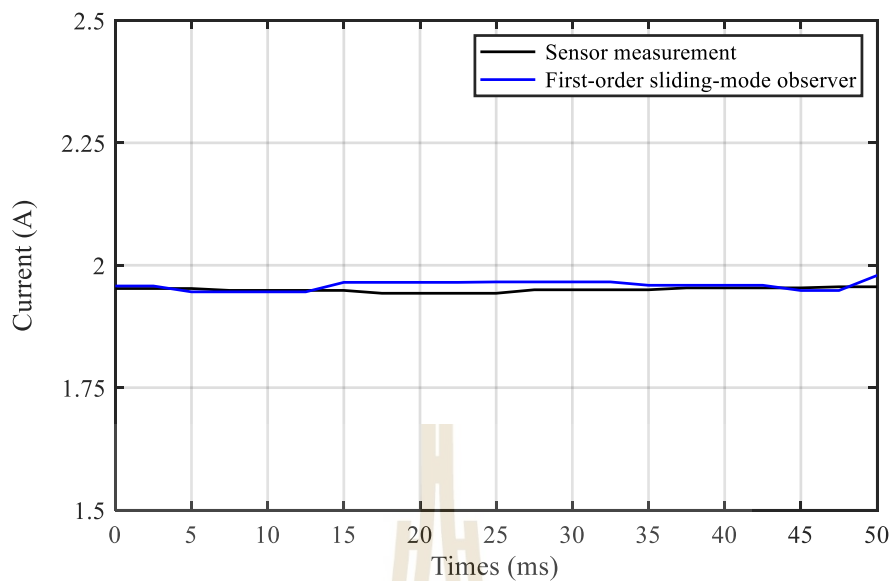


รูปที่ 6.18 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว
ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง

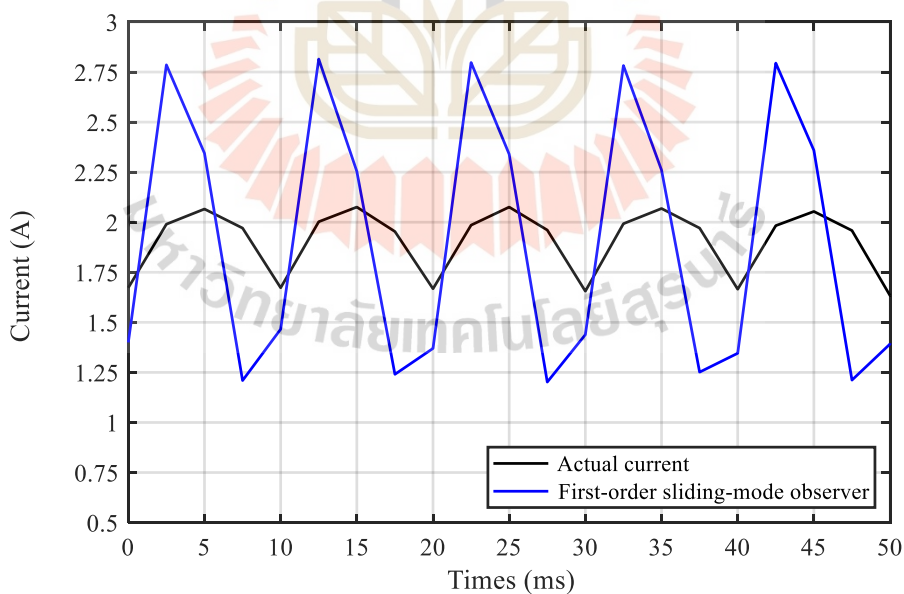


ตารางที่ 6.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง

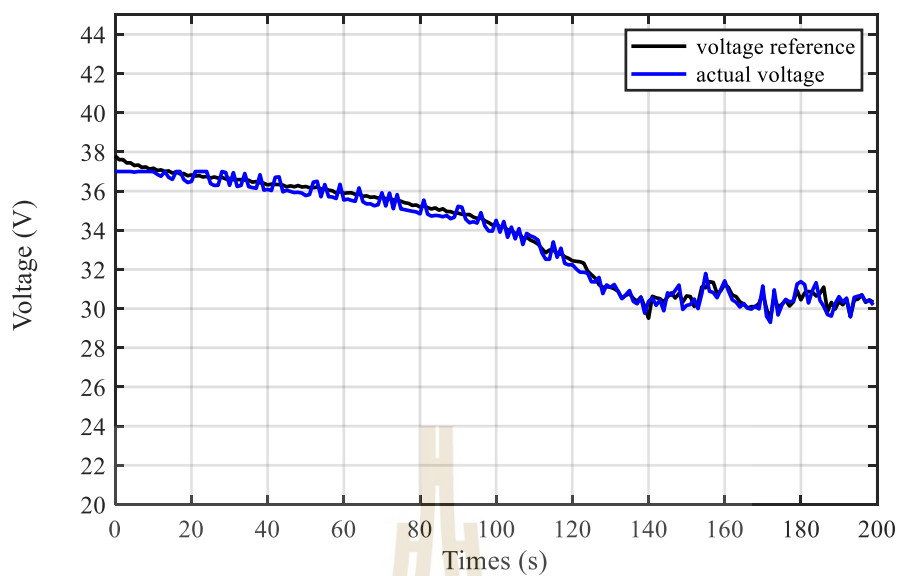
แผงพีวี	ความเข้มแสง (irradiance)	33500 lx
	กำลังงานมากที่สุด : T	60.08 W
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.94 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	30.97 V
	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	2.6 A
	แรงดันวงจรเปิด (V_{oc})	38 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่ง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	C_n	500 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำนาย	0.04 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



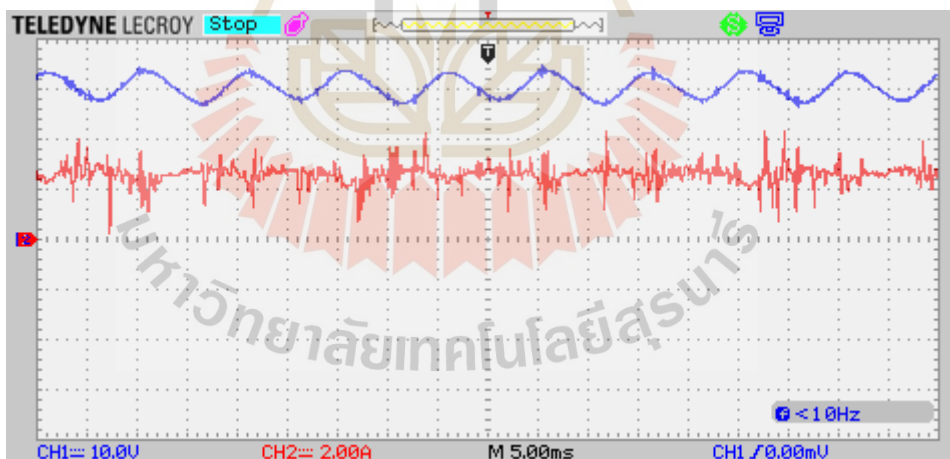
รูปที่ 6.19 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว



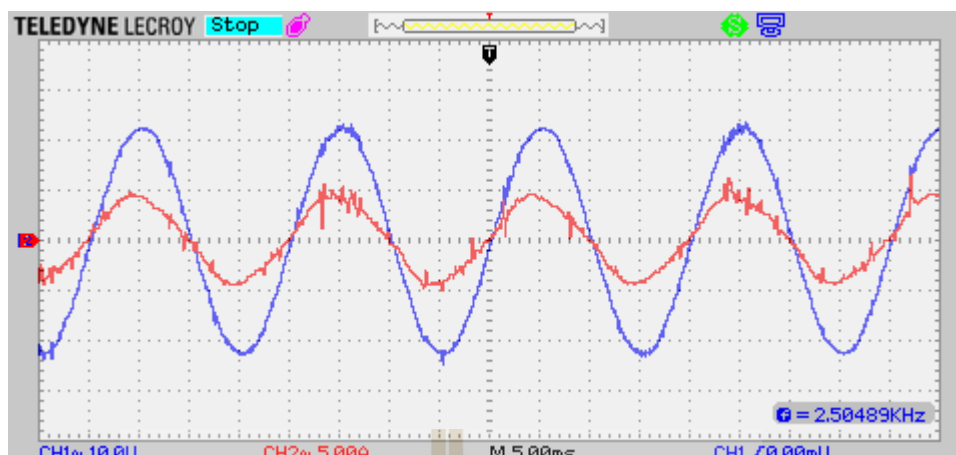
รูปที่ 6.20 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีน้ำเงิน) ของตัวสังเกตสถานะโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 6.21 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนาค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง



รูปที่ 6.22 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกิดสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง



รูปที่ 6.23 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว
ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการ
เลื่อนอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของ
อินเวอร์เตอร์พีวี

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี ในสถานะอยู่ตัว	1.88 A	1.95 A
ขนาดของความพลั่วของ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลออกจากแผงพีวี	0.4 A	1.55 A
แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม แผงพีวีในสถานะอยู่ตัว	31.2 V	30.5 V
ค่ายอดของแรงดันกริดเอซี	22.5 V	22.5 V
ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริด	4.5 A	4.5 A

6.3.2 ผลการทดลองชุดฮาร์ดแวร์ที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ในตารางที่ 6.7 ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีค่าเกณฑ์ $h_1 = 500$, $k_1 = 500$, $h_2 = 1800$ และ $k_2 = 500$ เมื่อแทนค่าลงในอสมการ $4k_2h_2 > h_1^2C_n(8k_2 + 9k_1^2C_n)$ จะได้ว่า

$$4(500)(1800) > (500)^2(1000 \times 10^{-6})((8(500) + 9(500)^2(1000 \times 10^{-6})) \rightarrow$$

$$36 \times 10^5 > (250)(4000 + 2250) \rightarrow 36 \times 10^5 > (250)(6250) \rightarrow$$

$$36 \times 10^5 > 15.625 \times 10^5 \text{ นั่นคืออสมการ } 4k_2h_2 > h_1^2C_n(8k_2 + 9k_1^2C_n) \text{ เป็นจริง}$$

ดังนั้นตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ

ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แผนการควบคุม และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 6.1, 6.12 และ 6.24 ตามลำดับ เมื่อตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f = 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุไม่มีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ ($\Delta C = 0$) ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมี $C_n = 1000 \mu\text{F}$ และอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 6.7 ผลการทดลองให้การประมาณค่าและผลตอบสนองดังนี้ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแฉงพีวีที่ได้จากการประมาณค่า (i_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแฉงพีวีที่ได้จากการวัด (sensor measurement) (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงในรูปที่ 6.25 แต่การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแฉงพีวี (i_{sa}) จะติดตามพลวัตและมีความพลัวที่ใกล้เคียงกับความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (actual current) (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.26 ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองจะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแฉงพีวีที่มีสมรรถนะรวดเร็วกว่าการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง เพราะตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีโครงสร้างที่ชดเชยการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแฉงพีวี และมีค่าเกณฑ์ k_2 ที่มากเพียงพอ เอ็มพีพีทีใช้ช่วงระยะเวลาช่วงหนึ่งในการทำนายค่าแรงดันอ้างอิงของแฉงพีวี (V_{ref}) ที่ลดลงจากแรงดันเปิด ($V_{oc, PV}$) จนถึงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะชั่วคราว และเอ็มพีพีทีจะทำนายค่าแรงดันอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสลับกันใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมในสถานะอยู่ตัว การทำนายค่าแรงดันอ้างอิงมีสมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 6.27 แฉงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (actual voltage) (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิง (voltage reference) ในสถานะอยู่ตัว แฉงพีวีจึงผลิตและจ่ายกำลังงานเฉลี่ย ($P_{sa_avg} = v_{sa_avg}i_{sa_avg}$) ที่ใกล้เคียงกับกำลังงานมากที่สุด (P_{max}) หรือแฉงพีวีมีจุดการทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี แฉงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) ที่มีความพลัว และแฉงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ที่มีความพลัวเล็กน้อยในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.28 แรงดันกริดเอซี (e_g) และกระแสไฟฟ้าที่

ไหลเข้ากริด (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 6.29 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานสามารถจ่ายกำลังงานเฉลี่ยถึงกริดเอซีได้ การใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี จึงมีความเป็นไปได้

เมื่อตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ($\Delta f \neq 0$) กล่าวคือตัวเก็บประจุมีการเบี่ยงเบนของค่าความจุ ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนมี $C_n = 500 \mu\text{F}$ แต่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมี $C = 1000 \mu\text{F}$ จะได้ว่า $\Delta C = 500 \mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ในตารางที่ 6.8 ผลการทดลองจะให้การประมาณค่าเฉลี่ยและผลตอบสนองที่เหมือนกับผลการทดลองที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ แต่ตัวสังเกตสถานะประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่แตกต่างจากการประมาณค่าที่เกิดจากการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์ การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (\hat{i}_{sa_avg}) มีความใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (i_{sa_avg}) ในสถานะอยู่ตัว และแสดงได้ในรูปที่ 6.30 แต่การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี (\hat{i}_{sa}) มีความพลัวที่มากกว่าความพลัวของกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.31 ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความพลัวที่มากกว่าความพลัวของการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับหนึ่ง เพราะตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองมีสมรรถนะของการประมาณค่าที่รวดเร็วกว่า เอ็มพีพีทีทำนายค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม (V_{mp}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.32 แผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม (v_{sa_avg}) ติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว แผงพีวีมีแรงดันที่ตกคร่อมขณะหนึ่ง (v_{sa}) และแผงพีวีมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกขณะหนึ่ง (i_{sa}) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.33 แรงดันกริดเอซี (e_g) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (i_L) มีมุมเฟสตรงกัน ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงได้ในรูปที่ 6.34 กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะอยู่ตัว ผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีแสดงในตารางที่ 6.9

```

// Second order Sliding-mode Observer

Vdc_est_k = Vdc_est_kl + Ts*((Idc_est_kl - Iac*u)/Cn)+(h1*ey) + (k1*sqrt(abs(ey))*sgn_ey);
Idc_est_k = Idc_est_kl + Ts*(k2*sgn_ey + h2*ey);
if (Idc_est_k < 0) { Idc_est_k = 0; }
Vdc_est_kl = Vdc_est_k;
Idc_est_kl = Idc_est_k;
}

if (choose == 1 || choose == 2){
if (Ts_count < 200) {
Sum_Vdc_est = Sum_Vdc_est + Vdc_est_k;
Sum_Idc_est = Sum_Idc_est + Idc_est_k;
Ts_count = Ts_count + 1;
}
else if (Ts_count == 200){
Vdc_est_avg = Sum_Vdc_est/200;
Idc_est_avg = Sum_Idc_est/200;
Sum_Vdc_est = 0;
Sum_Idc_est = 0;
Ts_count = 0;
}
}

// Find average Idc and Vdc
if (MPPTin_count < 200) {
Sum_Vdc = Sum_Vdc + Vdc;
Sum_Idc = Sum_Idc + Idc;
MPPTin_count = MPPTin_count + 1;
}
else if (MPPTin_count == 200){
Vdc_avg = Sum_Vdc/200;
Idc_avg = Sum_Idc/200;
Sum_Vdc = 0;
Sum_Idc = 0;
MPPTin_count = 0;
}

// if Period MPPT = 80 ms , must change 200 to 1600
// because 200 use Period MPPT = 10 ms

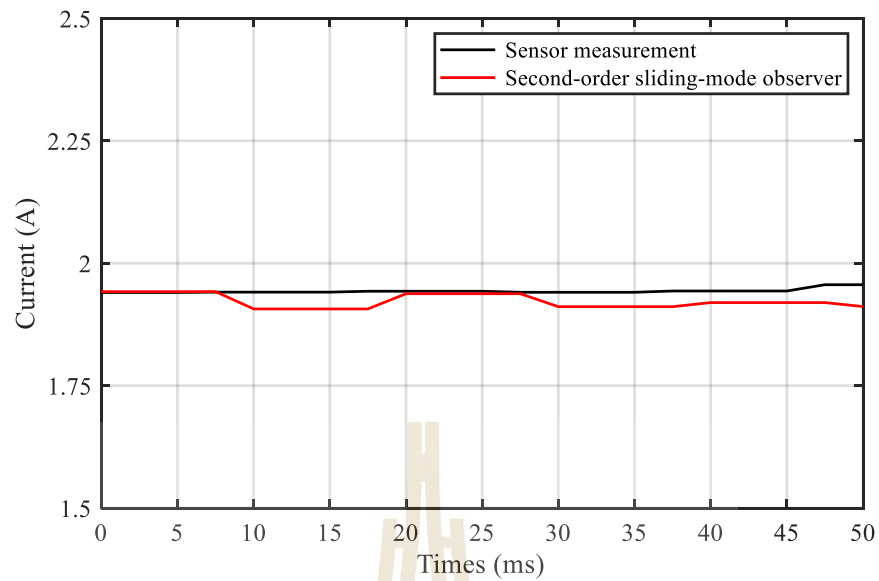
if (MPPT_count == 0){
Vpv_kl = Vdc_avg; // Vpv_kl = Vdc_ref;
Ppv_kl = Vdc_avg * Idc_est_avg; // Ppv_kl = Ppv_k; Idc_est_avg
MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if (MPPT_count < 800){
MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if (MPPT_count == 800){
Vpv_k = Vdc_avg;
Ppv_k = Vdc_avg * Idc_est_avg; // Idc_est_avg , Idc_avg
if ((Ppv_k - Ppv_kl)>0) { sgn_Ppv = 1; }
else if ((Ppv_k - Ppv_kl)<0) { sgn_Ppv = -1; }
else { sgn_Ppv = 0; }
if ((Vpv_k - Vpv_kl)>0) { sgn_Vpv = 1; }
else if ((Vpv_k - Vpv_kl)<0) { sgn_Vpv = -1; }
else { sgn_Vpv = 0; }
Vdc_k = Vpv_kl + 0.35*sgn_Ppv*sgn_Vpv;
Vdc_ref = Vdc_k;
if (Vdc_ref > 37) {Vdc_ref = 37;}
if (Vdc_ref < 28) {Vdc_ref = 28;}
MPPT_count = 0;
}
}

```

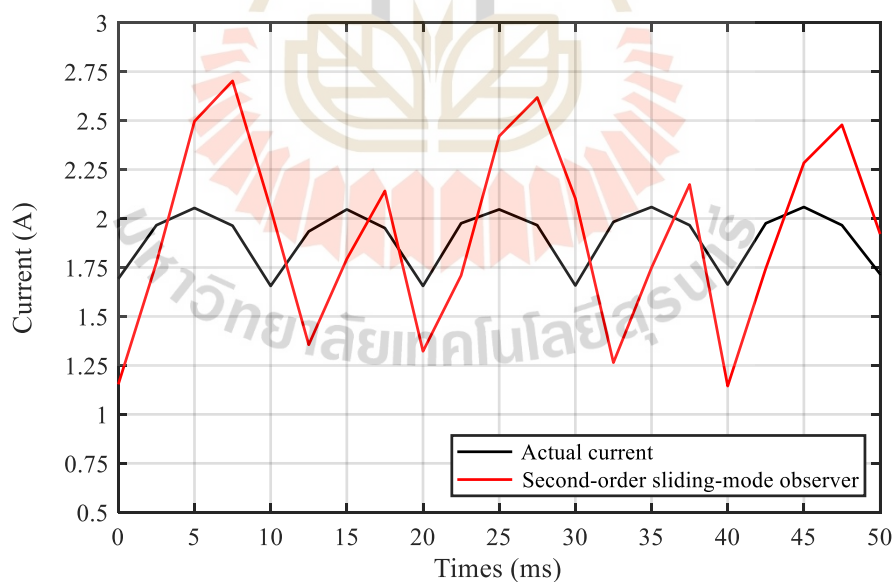
รูปที่ 6.24 ตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 6.7 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี ที่ใช้ในการทดลอง

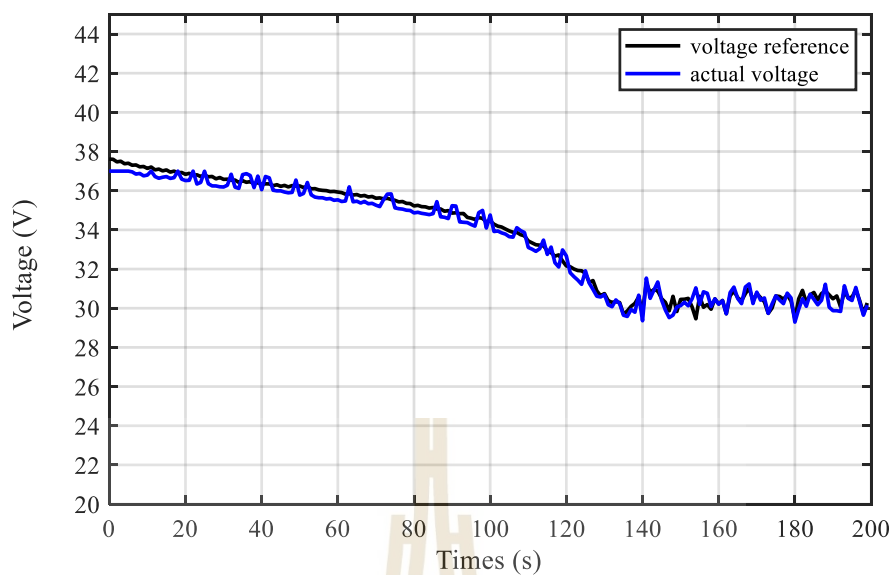
แผงพีวี	ความเข้มแสง (irradiance)	33500 lx
	กำลังงานมากที่สุด : T	60.08 W
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.94 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	30.97 V
	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	2.6 A
	แรงดันวงจรเปิด (V_{oc})	38 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมด การเลื่อนอันดับสอง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	k_2	500
	C_n	1000 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำนาย	0.04 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม แรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม กระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



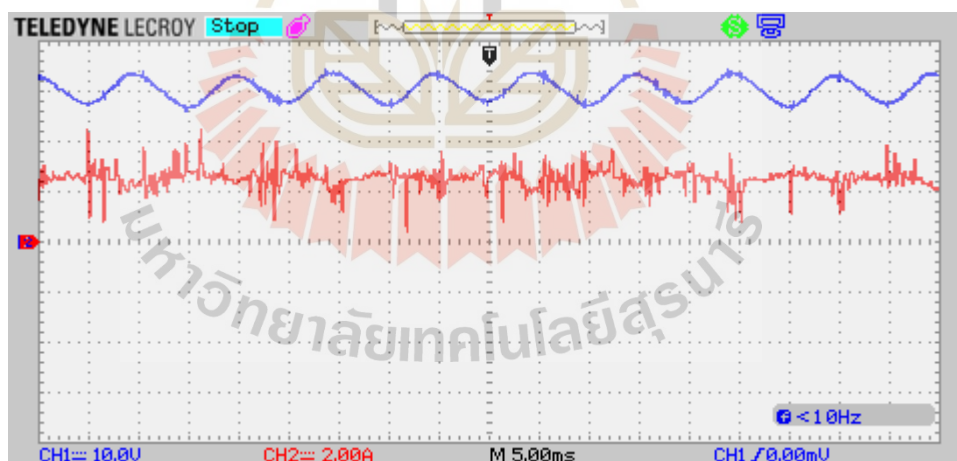
รูปที่ 6.25 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแฉงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว



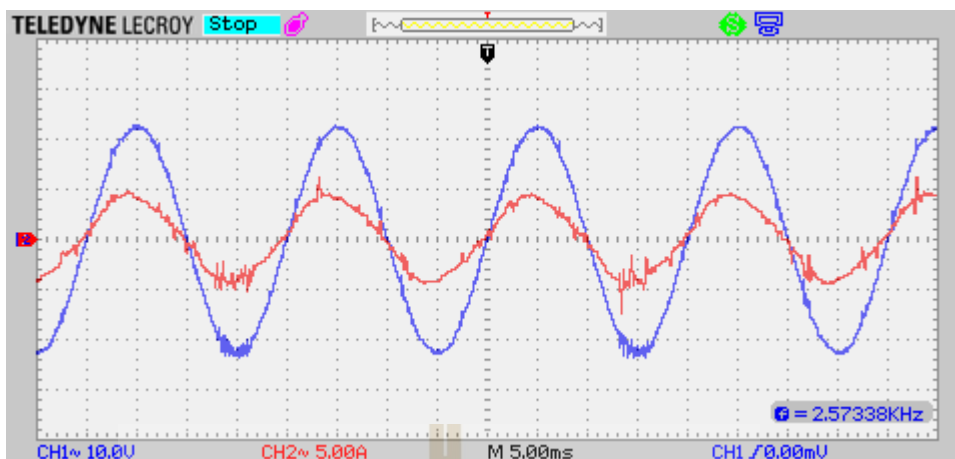
รูปที่ 6.26 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแฉงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเลื่อนอันดับสองในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 6.27 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง



รูปที่ 6.28 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

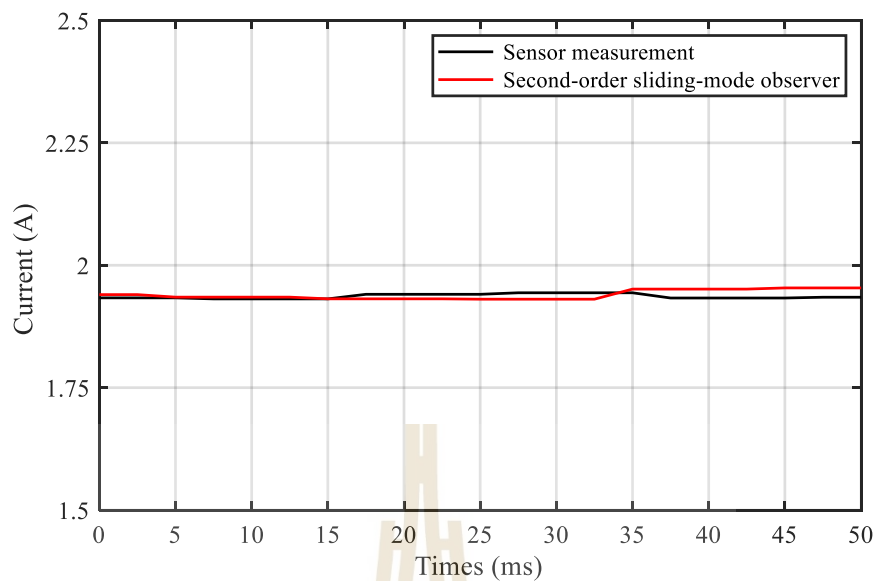


รูปที่ 6.29 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว
ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะ โหมคการเลื่อนอันดับสอง

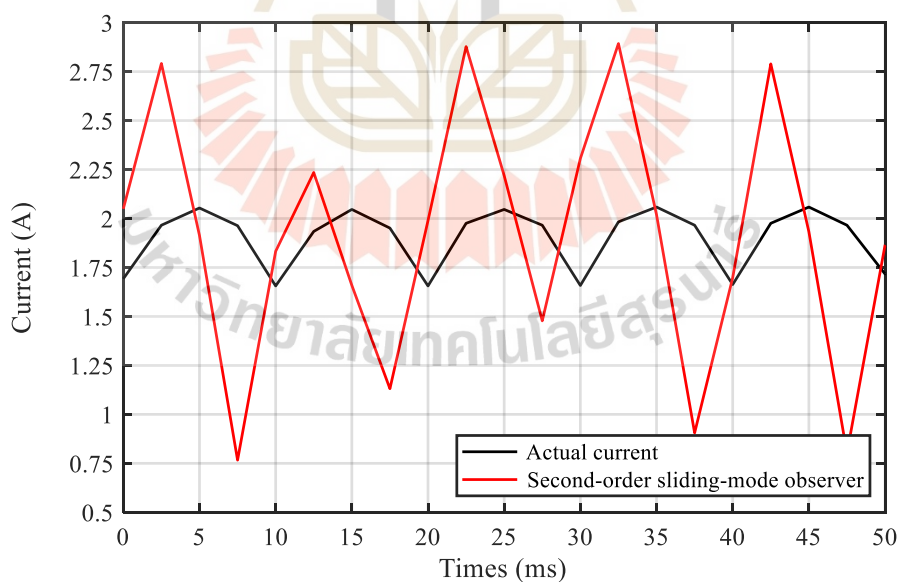


ตารางที่ 6.8 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมคการเลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้ในการทดลอง

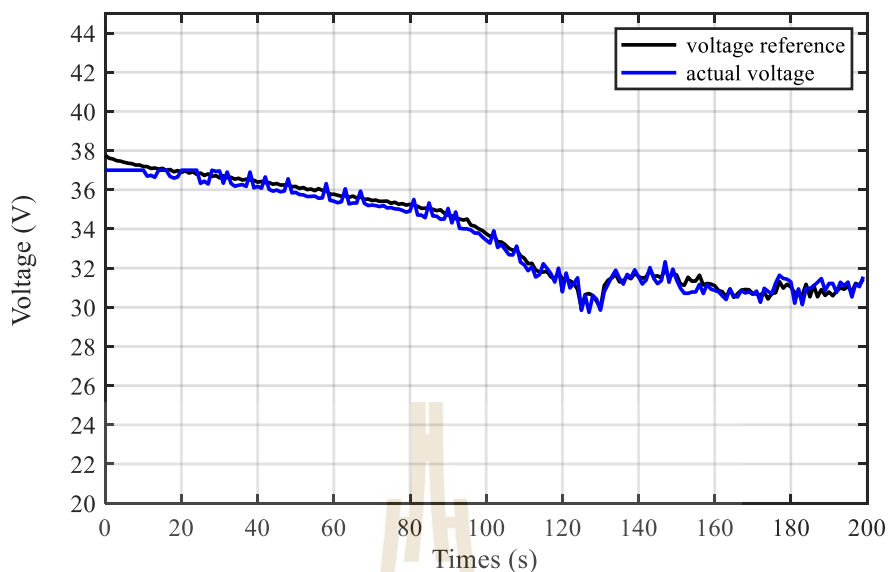
แผงพีวี	ความเข้มแสง (irradiance)	33500 lx
	กำลังงานมากที่สุด : T	60.08 W
	กระแสไฟฟ้าที่จุด P_{max} (I_{mp})	1.94 A
	แรงดันที่จุด P_{max} (V_{mp})	30.97 V
	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	2.6 A
	แรงดันวงจรเปิด (V_{oc})	38 V
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$e_s(t) = 22.63\sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS}
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุ่มวัด)	20 kHz
ตัวสังเกตสถานะโหมค การเลื่อนอันดับสอง	h_1	500
	h_2	1800
	k_1	500
	k_2	500
	C_n	500 μ F
เอ็มพีพีที	ค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง : M	0.35
	คาบระยะเวลาการทำงาน	0.04 s
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม แรงดันดีซี	K_{Pv}	0.1
	K_{Iv}	1
ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม กระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10



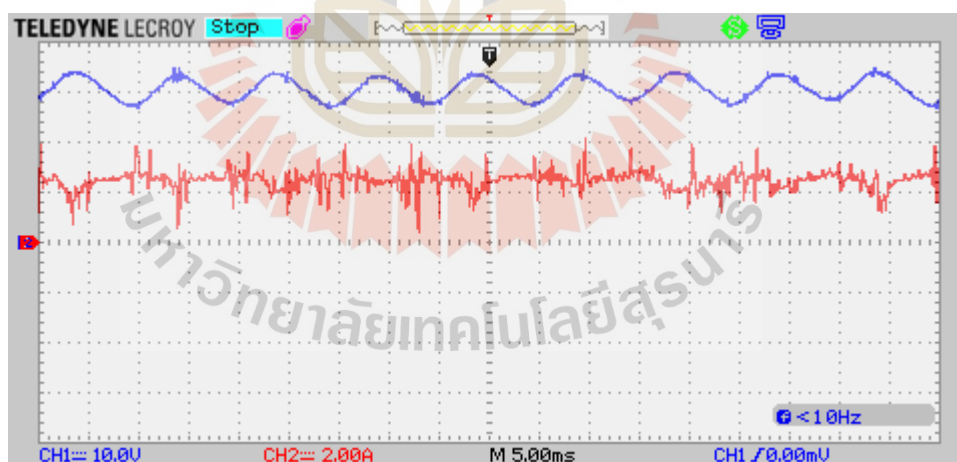
รูปที่ 6.30 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเคลื่อนอันด้บสองในสถานะอยู่ตัว



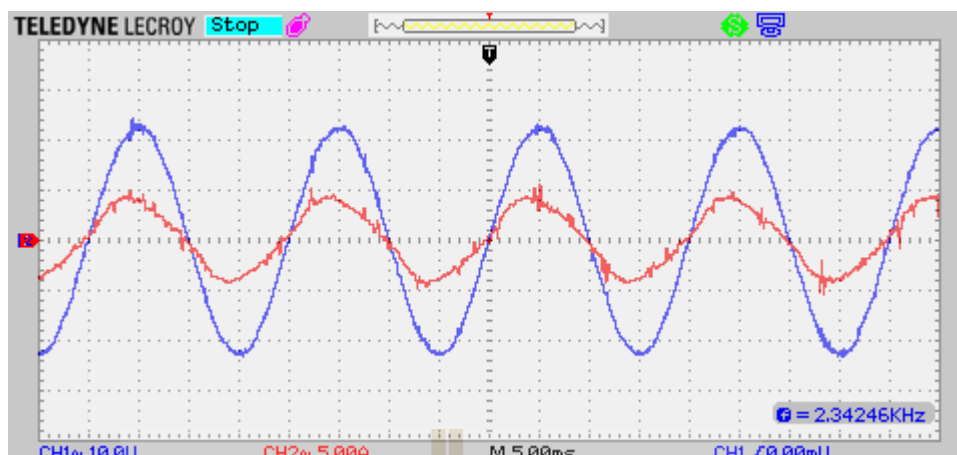
รูปที่ 6.31 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีดำ) และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า (สีแดง) ของตัวสังเกตสถานะ โหมดการเคลื่อนอันด้บสองในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 6.32 แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด (สีน้ำเงิน) และแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการทำนายค่าของเอ็มพีพีที (สีดำ) ในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง



รูปที่ 6.33 แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่ใช้งานตัวส่งเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

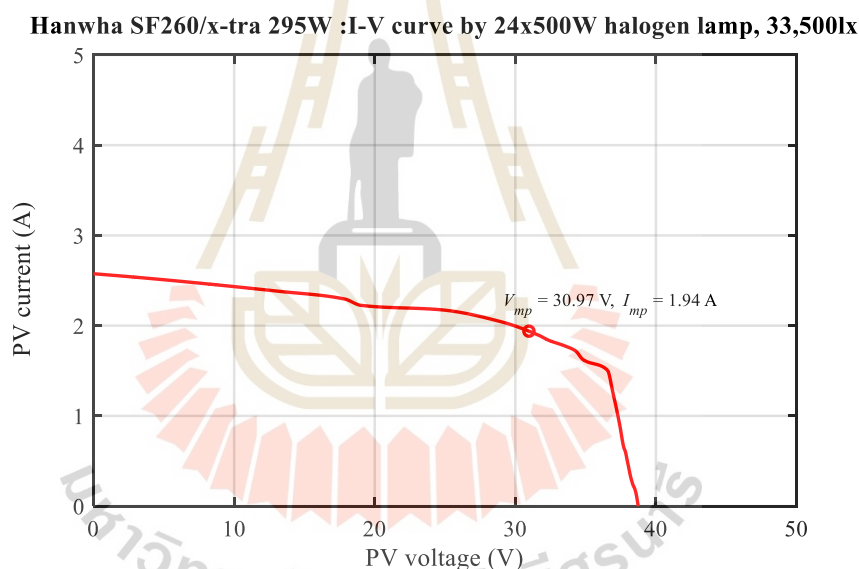


รูปที่ 6.34 แรงดันกริดเอซี (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) ในสถานะอยู่ตัว
ในกรณีที่ใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง

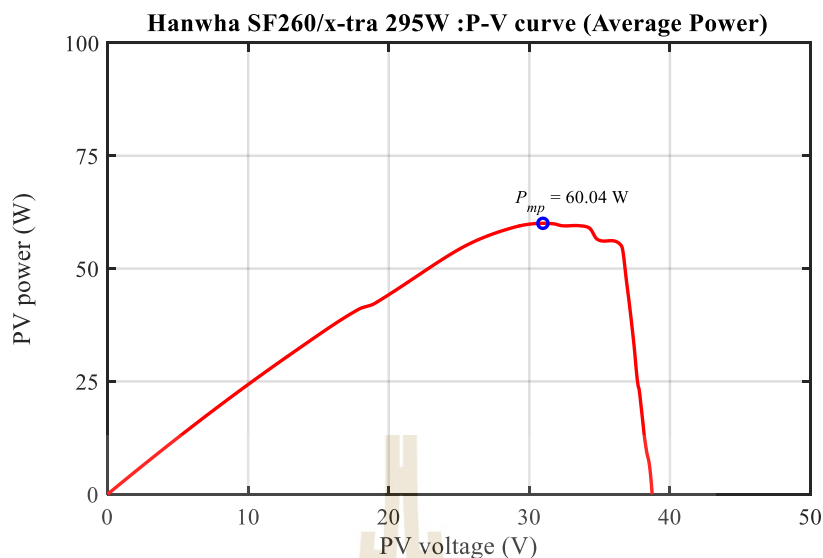
ตารางที่ 6.9 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่เกิดจากการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหมดการ
เลื่อนอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของ
อินเวอร์เตอร์พีวี

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวี ในสถานะอยู่ตัว	1.91 A	1.93 A
ขนาดของความพลีวของ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลออกจากแผงพีวี	1.08 A	1.75 A
แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม แผงพีวีในสถานะอยู่ตัว	30.42 V	30.38 V
ค่ายอดของแรงดันกริดเอซี	22.5 V	22.5 V
ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริด	4.5 A	4.5 A

หลังจากการทดลองระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์จะไม่เชื่อมต่อกับแผงพีวี แต่โหลดตัวต้านทานที่ปรับค่าความต้านทานได้จะเชื่อมต่อกับแผงพีวี เมื่อโหลดตัวต้านทานมีค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง แผงพีวีจะมีแรงดันที่ตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน มาตรฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบดิจิทัลที่วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี จะให้ค่าที่อ่านได้หรือข้อมูลที่นำมาใช้ในการพล็อตกราฟคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้า (i_{sa}) และแรงดัน (v_{sa}) และใช้ในการพล็อตกราฟคุณลักษณะของกำลังงาน (P_{sa}) และแรงดัน (v_{sa}) ที่แสดงในรูปที่ 6.35 และ 6.36 ตามลำดับ กำลังงานที่แผงพีวีผลิตได้จะคำนวณจากผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดัน กราฟคุณลักษณะของกำลังงานและแรงดันจะแสดงกำลังงานมากที่สุด (P_{max}) ที่แผงพีวีผลิตได้ในเวลาที่ผ่านไปหลังจากเวลาที่เสร็จสิ้นการทดลองไม่นาน



รูปที่ 6.35 กราฟคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้า (i_{sa}) และแรงดัน (v_{sa}) ของแผงพีวี ที่ได้จากการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์เทียม



รูปที่ 6.36 กราฟคุณลักษณะของกำลังงาน (P_{sa}) และแรงดัน (v_{sa}) ของแผงพีวี ที่ได้จากการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์เทียม

6.4 สรุป

ผลการทดลองแสดงถึงความเป็นได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เมื่อหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับ และแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีเฟสเดียว ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบแทนแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและกระแสไฟฟ้ากริด และให้การประมาณค่าเฉลี่ยหรือการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญหรือมีความแตกต่างน้อยในสถานะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าและการคำนวณจะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการวัด แต่กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่ามีความพลั่วที่แทบไม่มีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีและผลตอบแทนของระบบควบคุมวงปิด เอ็มพีพีที่ทำนายค่าหรือสร้างแรงดันอ้างอิงที่ใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงที่ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานตรงกับจุดเอ็มพีพีในสถานะอยู่ตัว และแผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดซึ่งโครโนซ์กับแรงดันกริดเอซี และแผงพีวีผลิตและจ่ายกำลังงานไฟฟ้าถึงกริดเอซี

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทำวิจัย

การควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซี ประกอบด้วยหน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีหรือเอ็มพีพีที (MPPT) ตัวควบคุมแรงดันดิซีที่ติดกร่อมแผงพีวีหรือตัวควบคุมแรงดันดิซี เฟสล็อกลูป (phase-locked loop: PLL) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีหรือตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด หน่วยมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยหรือตัวสังเกตสถานะที่ทำหน้าที่แทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี อินเวอร์เตอร์มีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุและแผงพีวี ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกับแผงพีวี ตัวเก็บประจุรักษาแรงดันของแผงพีวีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง อินเวอร์เตอร์มีด้านเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับตัวเหนี่ยวนำและกริดเอซี ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่ออนุกรมกับกริดเอซี ตัวเหนี่ยวนำรักษากระแสไฟฟ้ากริดที่มีความเรียบ กริดเอซีคือด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่มีด้านทุติยภูมิเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว 220 V_{rms} 50 Hz หรือกริดเอซีของการไฟฟ้า

ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองแสดงถึงความเป็นได้สูงในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี เพราะเมื่อหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวีเฟสเดียว การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยตรงและการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่า มีสมรรถนะที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสถานะอยู่ตัว และระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสถานะอยู่ตัวเช่นเดียวกัน ในการจำลองสถานการณ์ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีสมรรถนะที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสถานะชั่วคราว แต่ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งและอันดับสองให้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีสมรรถนะที่แตกต่างกันในสถานะชั่วคราว กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณและค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแผงพีวีที่ได้จากการวัดในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นหน่วยประมาณ

ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับและแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์พีวี จะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีสมรรถนะที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว การใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจึงแทนที่ตัวสังเกตสถานะได้ การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่มีความพลั่วแทบไม่มีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากแผงพีวี และแทบไม่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิด เอ็มพีพีทีที่ทำงานค่าหรือสร้างแรงดันอ้างอิงที่ใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงที่ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่ตรงกับจุดเอ็มพีพีในสถานะอยู่ตัว และแผงพีวีมีแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมติดตามแรงดันอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดซึ่งโครโนซกับแรงดันกริดเอซี แผงพีวีผลิตและจ่ายกำลังงานไฟฟ้าถึงกริดเอซี ดังนั้นการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมด การเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสอง มีความเป็นไปได้สูงมากในทางปฏิบัติ และเมื่อเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีเกิดการชำรุด หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตสถานะจะทำหน้าที่ชั่วคราวจนกว่าเซนเซอร์ได้รับการแก้ไขหรือการนำเซนเซอร์ที่ใช้งานได้อย่างสมบูรณ์มาแทนที่เซนเซอร์ที่ผิดปกติ

7.2 ข้อเสนอแนะ

การนำหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมาใช้แทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีในทางปฏิบัติ จะต้องพิจารณาและดำเนินการเพิ่มเติมดังนี้

7.2.1 การทดลองระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์ภาคเดียวเฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซี การปรับคาบระยะเวลาของการสุ่มวัดของเอ็มพีพีที จะมีผลต่อระบบคือถ้าใช้ที่มีค่ามาก จะทำให้ระบบเข้าสู่จุดเอ็มพีพีได้ช้า แต่ถ้าใช้น้อยไปจะทำให้ระบบเกิดการแกว่งเกินไป จนไม่สามารถวิ่งเข้าสู่จุดเอ็มพีพีได้

7.2.2 ตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง และตัวสังเกตสถานะโหมดการเลื่อนอันดับสองมาใช้แทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี หากมีคาบการสุ่มวัดที่น้อยมาก ๆ จะทำให้ตัวสังเกตสถานะมีสมรรถนะที่ดีมากขึ้นในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของแผงพีวี

รายการอ้างอิง

- I.-S. Kim and M.-J. Youn “**Variable-structure observer for solar-array current estimation in a photovoltaic power-generation system**” Electric Power Applications, IEE Proceedings, Volume: 152 , Issue: 4 , July , 2005, pp 953-959.
- Jaime A. Moreno, Member, IEEE (2008). “**A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers**” 47th IEEE Conf. on Decision and Control Cansun, Mexico, Dec.: 2856-2861
- Fernando Jaramillo-Lopez, IFAC (2013) . “**Adaptive control scheme for grid-connected photovoltaic systems with unknown**” 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, Caen, France, July.: 671-676
- Fernando Jaramillo-Lopez, IEEE (2017). “**Adaptive control for a Class of Uncertain Nonlinear Systems: Application to Photovoltaic Control Systems**” IEEE Transactions on Automatic Control, Volume: 62 , NO. 1 , January , 2017, pp 393-398.
- Wirote Sangtungtong and Narongdech, IEEE(2020). “**Second-Order Sliding-Mode Observer for Solar-Array Current Estimation**” IEEE 3rd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA), Geumjeong-gu, Busan, South Korea, 9-11 October, 2020. Pp 1 – 5.
- Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**, A John Wiley & Sons Ltd, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, 2011.
- ถาวร หินซุข และคณะ, “การควบคุมวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ PWM เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีด้วย **TMS320F28335**” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38, พระนครศรีอยุธยา, 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า 253-256
- ถาวร หินซุข. (2558). อินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- สรารวุฒิ สุจิตจร. (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: เพ็ญรสัน เอ็นดูเคชั่น อินโดไชน่า จำกัด.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

#####
// MCU: Sliding-mode observer MPPT for PV panel.
#include "DSP28x_Project.h" // Device Headerfile and Examples Include File
#include "config.h"
#include "Solar_F.h"          // Solar Library: SPLL, Data-Logger, INV controller
#include <math.h>

//=====
// Function Prototype & ADC Parameter [Do not edit]
//=====

// external function prototypes
extern void InitSysCtrl(void);           // Enable to use InitSysCtrl()
extern void InitPieCtrl(void);          // Enable to use InitPieCtrl()
extern void InitPieVectTable(void);     // Enable to use InitPieVectTable()
extern void Gpio_setup(void);           // Initial GPIO for multiplex GPIO
extern void ADC_SETUP(void);            // Initial ADC setup()
#if Flash_boot_ENABLE
extern void InitFlash(void);             // Boot form Flash fuccion
extern unsigned int RamfuncsLoadStart;
extern unsigned int RamfuncsLoadEnd;
extern unsigned int RamfuncsRunStart;
#endif
#if Ext_INT_ENABLE
extern interrupt void xint1_isr(void);
extern interrupt void xint2_isr(void);
extern void xint_initial(void);
extern volatile Uint16 Program_mode;
#endif

```

```

#if EPWM1_ENABLE
    extern void ePWM1_setup(void); // ISR Timing-Based
#endif
#if EPWM2_ENABLE
    extern void ePWM2_setup(void); // Inverter drive #1
#endif
#if EPWM3_ENABLE
    extern void ePWM3_setup(void); // Inverter drive #2
#endif
// ISR Prototype statements , Program calculation loop.
interrupt void epwm1_timer_isr(void); // ISR (20kHz)
// ISR configuration & Grid & SPL
#define GRID_FREQ 50.0 // 50Hz Grid
    Frequency(Default 50/60 Hz)
#define ISR_FREQUENCY 20000.0 // 20 kHz ISR Frequency
#define T_intigral 0.00001 // Intigral times
#if NOTCH_FLTR_ENABLE
    NOTCH_COEFF_F notch_TwiceGridFreq;
    NOTCH_VARS_F Vac_pu_a;
    NOTCH_VARS_F Iac_pu_a;
    #define c1 0.1
    #define c2 0.00001
#endif
#if SINEANALYZER_ENABLE
    SINEANALYZER_DIFF_wPWR_F sin_analyzer;
#endif
#if DATA_LOG_ENABLE
    DLOG_3CH_F dlog_3ch;

```

```

#define BUF_SIZE 200

    float32 DBUFF_CH1[10];

    float32 DBUFF_CH2[BUF_SIZE];

    float32 DBUFF_CH3[BUF_SIZE];

    float32 dval1,dval2,dval3;

//    DLOG_5CH_F dlog_5ch;
//    #define BUF_SIZE 100
//    float32 DBUFF_CH1[10];
//    float32 DBUFF_CH2[BUF_SIZE];
//    float32 DBUFF_CH3[BUF_SIZE];
//    float32 DBUFF_CH4[BUF_SIZE];
//    float32 DBUFF_CH5[BUF_SIZE];
//    float32 dval1,dval2,dval3,dval4,dval5;
#endif

#if SPLL_1PH_ENABLE
    SPLL_1ph_F spll1;

    SPLL_1ph_F_NOTCH_COEFF spll_notch_coef1;
#endif

#if VIC_PI_ENABLE
    CNTL_VC_F cntl_vc; // DATA structure variable For Voltage controller
    CNTL_CC_F cntl_cc; // DATA structure variable For Current controller
#endif

//=====
// Variable Prototype [Can edit]
//=====

// ADC constants ==> [Do not edit]
#define PI 3.141592654 // PI constants
#define ADC_A_Fullscale 3.00 // ADC full-voltage

```



```

#define ADC_A_Offset 1.50 // ADC offset-voltage
#define ADC_D_Fullscale 4095.0 // ADC full-scale
#define ADC_D_Offset 2048.0 // ADC offset-scale

// Sensor gain ==> [Can not edit]
//#define Vdc_ref 28.0 // Vdc reference
#define Gain_Vdc 66.67 // Vdc Sensor gain (200V/3V)
#define Gain_Idc 3.33 // Idc Sensor gain (10A/3V)
#define Gain_Vac 141.509 // Vgrid Sensor gain (150Vrms/1.06Vrms)
#define Gain_Iac 18.868 // Igrid Sensor gain (20Arms/1.06Vrms)
    for HX-10NP
//#define Gain_Iac 9.434 // Igrid Sensor gain (10Arms/1.06Vrms) for HX-
    05NP
#define Vdc_base 200.0 // DC voltage range measurement : 0 -
    200 Vdc
#define Idc_base 10.0 // DC current range measurement : 0 - 10
    Adc
#define Vac_base 212.13 // AC voltage range measurement : 0 -
    150 Vrms
#define Iac_base 26.26 // AC current range measurement : 0 - 20
    Arms for HX-10NP (28.28)
//#define Iac_base 14.14 // AC current range measurement : 0 - 10 Arms for
    HX-05NP

// Global variable prototypes ==> [Please edit if do you need more ADC channel]
int16 Vadc_a0; // ADCINA0 channel results
int16 Vadc_a1; // ADCINA1 channel results
int16 Vadc_a2; // ADCINA2 channel results
int16 Vadc_a3; // ADCINA3 channel results

```

```

// Global variable prototypes ==> [Please edit for define your variable]
float32 Vdc; // DC Bus voltage
float32 Vdc_pu; // DC Bus voltage [pu.]
float32 Idc; // DC Bus current
float32 Idc_pu; // DC Bus current [pu.]
float32 Vac; // Low-side grid voltage
float32 Vac_pu; // Low-side grid voltage [pu.]
float32 Iac; // Low-side grid current
float32 Iac_pu; // Low-side grid current [pu.]
float32 Iac_ref; // Igrid reference = I*sin(wt)
float32 U_ref_P,U_ref_N; // Reference signal for PWM compare
uint16 LED_Count = 0; // LED counter

// Sliding-mode Observer gain and mean calculator values
#define k1 500
#define k2 500
#define h1 500
#define h2 1800
#define Cn 0.0005 // Cn = 500 uF
#define Ln 0.005 // Ln = 5 mH
float32 Vdc_est_k = 0; // Initial value of Vdc_est
float32 Vdc_est_k1 = 0; // Initial value of Vdc_est(k-1)
float32 Idc_est_k = 0; // Initial value of Idc_est
float32 Idc_est_k1 = 0; // Initial value of Idc_est(k-1)
float32 ey; // Error of Vdc
float32 u = 0;
int16 sgn_ey , MPPT_count = 0, MPPTin_count = 0;
uint16 count = 0 , choose = 0;
uint16 Ts_count = 0;

```

```

float32 Vdc_avg, Vdc_est_avg, Idc_avg, Idc_est_avg;
float32 Sum_A = 0, Sum_B = 0, Sum_C = 0, Sum_D = 0, Vsa_k=0, Vsa_k1=0;
float32 Sum_Vdc = 0;
float32 Sum_Vdc_est = 0;
float32 Sum_Idc = 0;
float32 Sum_Idc_est = 0;
#define Ts 0.00005

// P&O MPPT parameter
float32 Vdc_ref = 40;          // Initial Vdc_ref = Voc
float32 Vpv_k=0, Vdc_k=0, Ppv_k=0;
int16 sgn_Ppv, sgn_Vpv;
float32 Vpv_k1 = 32;
float32 Ppv_k1 = 0;
int16 Tmppt_count = 0;

// ##### Main
Function#####
void main(void)
{
//=====
==
// Initialize System Control for F28335 [Do not edit]
//=====

InitSysCtrl(); //Initialize System Control in DSP2833x_SysCtrl.c file
#if Flash_boot_ENABLE
memcpy(&RamfuncsRunStart, &RamfuncsLoadStart, &RamfuncsLoadEnd -
&RamfuncsLoadStart);
InitFlash();    // call InitFlash in RAM (SARAM - L0)
#endif
}

```

```

// Specific clock setting for HSPCLK = 25 MHz
EALLOW;

SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK; // HSPCLK =
SYSCLKOUT/(2*ADC_MODCLK)= 25 MHz

EDIS;

Gpio_setup(); // Initialize GPIO for multiplex GPIO in GPIO_SETUP.c file
DINT; // Clear all interrupts and initialize PIE vector table
InitPieCtrl(); // Initialize PIE interrupts in the DSP2833x_PieCtrl.c file.
// Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;
// Initialize the PIE vector table in DSP2833x_PieVect.c.
InitPieVectTable();
// script for enable any Interrupts.
#if EPWM1_INT_ENABLE
    EALLOW; // This is needed to write to EALLOW protected registers
    PieVectTable.EPWM1_INT = &epwm1_timer_isr;
    EDIS; // This is needed to disable write to EALLOW protected registers
#endif
#if Ext_INT_ENABLE
    EALLOW; // This is needed to write to EALLOW protected registers
    PieVectTable.XINT1 = &xint1_isr;
    PieVectTable.XINT2 = &xint2_isr;
    EDIS; // This is needed to disable write to EALLOW protected registers
#endif

// Initialize ADC Peripherals
InitAdc(); // Initialize ADC module
ADC_SETUP(); // Initialize ADC configuration

```

```

// Initialize EPWM & ECAP Peripherals

EALLOW;

SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0; // Stop all the EPWM TB clocks
EDIS;

#if EPWM1_ENABLE
    ePWM1_setup();
#endif

#if EPWM2_ENABLE
    ePWM2_setup();
#endif

#if EPWM3_ENABLE
    ePWM3_setup();
#endif

EALLOW;

SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1; // Start all EPWM TB clocks
syncd
EDIS;

// Initialize External interrupt XINT1 On GPIO13, XINT1 On GPIO14
#if Ext_INT_ENABLE
    xint_initial();
#endif

// Initialize SPLL Peripherals
#if SPLL_1PH_ENABLE
    SPLL_1ph_F_init(GRID_FREQ,((float)(1.0/ISR_FREQUENCY)),&sp11);

    SPLL_1ph_F_notch_coeff_update(((float)(1.0/ISR_FREQUENCY)),(float)(
2*PI*GRID_FREQ*2),(float)0.00001,(float)0.1,&sp11);
#endif

// DATA NOTCH FILTER Initialize
#if NOTCH_FLTR_ENABLE

```

```

        NOTCH_FLTR_F_VARS_init (&Vac_pu_a);
        NOTCH_FLTR_F_VARS_init (&Iac_pu_a);
        NOTCH_FLTR_F_COEFF_Update
        (((float)(1.0/ISR_FREQUENCY)),(float)(2*PI*GRID_FREQ*2),(float)c2,(float)c1,&
        notch_TwiceGridFreq);
    #endif

    // DATA-logger Initialize
    #if DATA_LOG_ENABLE

        DLOG_3CH_F_init(&dlog_3ch);
        dlog_3ch.input_ptr1 = &dval1;
        dlog_3ch.input_ptr2 = &dval2;
        dlog_3ch.input_ptr3 = &dval3;
        dlog_3ch.output_ptr1 = &DBUFF_CH1[0];
        dlog_3ch.output_ptr2 = &DBUFF_CH2[0];
        dlog_3ch.output_ptr3 = &DBUFF_CH3[0];
        dlog_3ch.size = BUF_SIZE;
        dlog_3ch.trig_value = 60; // Beginner value
    for trigger datalog
        dlog_3ch.pre_scalar = 20000;
        dlog_3ch.status= 2;

    //
    // DLOG_5CH_F_init(&dlog_5ch);
    // dlog_5ch.input_ptr1 = &dval1;
    // dlog_5ch.input_ptr2 = &dval2;
    // dlog_5ch.input_ptr3 = &dval3;
    // dlog_5ch.input_ptr4 = &dval4;
    // dlog_5ch.input_ptr5 = &dval5;
    // dlog_5ch.output_ptr1 = &DBUFF_CH1[0];

```

```

//      dlog_5ch.output_ptr2 = &DBUFF_CH2[0];
//      dlog_5ch.output_ptr3 = &DBUFF_CH3[0];
//      dlog_5ch.output_ptr4 = &DBUFF_CH4[0];
//      dlog_5ch.output_ptr5 = &DBUFF_CH5[0];
//      dlog_5ch.size = BUF_SIZE;
//      dlog_5ch.trig_value= 0;          // Beginer value for trigger datalog
//      dlog_5ch.pre_scalar = 50;
//      dlog_5ch.status= 2;

#endif

// SINEANALYZER Initialize
#if SINEANALYZER_ENABLE

    SINEANALYZER_DIFF_wPWR_F_init (&sin_analyzer);
    sin_analyzer.SampleFreq = ISR_FREQUENCY;
    sin_analyzer.Threshold = 0.01 ;
    sin_analyzer.nsamplesMin = ((1.0)/ (GRID_FREQ + 5)) *
(ISR_FREQUENCY);
    sin_analyzer.nsamplesMax = ((1.0)/ (GRID_FREQ - 5)) *
(ISR_FREQUENCY);
#endif

=====

// Voltage & Current controller configuration [Can edit]

=====

#if VIC_PI_ENABLE

// Voltage controller Initialize

    CNTL_VC_F_init(&cntl_vc);          // PI controller #1 initial
    cntl_vc.Kp = (0.1);                // proportional
gain

```



```

        cntl_vc.Ki = (1.0);                // integral gain
        cntl_vc.Ti = (T_intigral);        // Pi integral time

// Current controller Initialize

        CNTL_CC_F_init(&cntl_cc);        // PI controller #2 initial
        cntl_cc.Kp = (100.0);            // proportional gain
        cntl_cc.Ki = (10.0);             // integral gain
        cntl_cc.Ti = (T_intigral);        // Pi integral time

    #endif

//=====
// Enable all interrupts & Main Background loop [Do not edit]
//=====

    #if Ext_INT_ENABLE
        IER |= M_INT1;                    // Enable INT4
        [XINT1],1 INT5 [XINT2]
    #endif

    #if EPWM1_INT_ENABLE
        IER |= M_INT3;                    // Enable CPU
        INT3 for EPWM1-6 INT
    #endif

// Enable Peripheral Interrupt Expansion [PIE]

    PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx1 = EPWM1_INT_ENABLE; // Enable
    EPWM1_INT in the PIE: Group 3

    PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx4 = Ext_INT_ENABLE; // Enable PIE group 1
    INT4 [XINT1]

    PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx5 = Ext_INT_ENABLE; // Enable PIE group 1
    INT5 [XINT2]

```

```

PieCtrlRegs.PIEIER4.bit.INTx1 = eCAP_INT_ENABLE; // Enable PIE group 4 for
eCAP1_INT

PieCtrlRegs.PIEIER4.bit.INTx2 = eCAP_INT_ENABLE; // Enable PIE group 4 for
eCAP2_INT

// Enable global Interrupt and higher priority real-time debug event
EINT;
ERTM;

// Background loop start:
for(;;)
{
    //Wait for ISR Running
}
}

// ##### ISR Program
#####

interrupt void epwm1_timer_isr(void){
//
*****
*****

if (Program_mode == 1) // Switch B
{

    // ADC data conversion reading

    Vadc_a0 = AdcMirror.ADCRESULT0;
    Vadc_a1 = AdcMirror.ADCRESULT1 - ADC_D_Offset - 19;
    Vadc_a2 = AdcMirror.ADCRESULT2 - ADC_D_Offset - 6;
    Vadc_a3 = AdcMirror.ADCRESULT3;

    // Reinitialize for next ADC sequence

```

```

    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reset SEQ1 to initial state
    //-----
    // ADC scaling conversion
    Vdc_pu = Vadc_a0/ADC_D_Fullscale; // Calculate Vdc (pu.): 0.0, 1.0
    Idc_pu = Vadc_a3/ADC_D_Fullscale; // Calculate Idc (pu.): 0.0, 1.0
    Vac_pu = Vadc_a1/ADC_D_Offset; // Calculate Vac (pu.): -1.0,
+1.0
    Iac_pu = Vadc_a2/ADC_D_Offset; // Calculate Iac (pu.): -1.0,
+1.0
    Vdc = Vdc_pu * Vdc_base; // Calculate Vdc : 0 - 200
Vdc
    Idc = Idc_pu * Idc_base; // Calculate Idc : 0 - 10 Adc
    Vac = Vac_pu * Vac_base; // Calculate Vac : 0 - 150
Vrms [-Vac_pk, +Vac_pk]
    Iac = Iac_pu * Iac_base; // Calculate Iac : 0 - 20 Arms [-
Iac_pk, +Iac_pk]

    #if NOTCH_FLTR_ENABLE
        Vac_pu_a.In = (Vac_pu);
        Iac_pu_a.In = (Iac_pu);
        NOTCH_FLTR_F_run (&Vac_pu_a, &notch_TwiceGridFreq);
        NOTCH_FLTR_F_run (&Iac_pu_a, &notch_TwiceGridFreq);
        //NOTCH_FLTR Output: .Out

    #endif

    #if SINEANALYZER_ENABLE
        sin_analyzer.Vin = Vac_pu_a.Out;
        sin_analyzer.Iin = Iac_pu_a.Out;
        SINEANALYZER_DIFF_wPWR_F_FUNC(&sin_analyzer);
        //SINEANALYZER Output: .Vrms, .Irms, .Prms, .SigFreq

    #endif

```

```

ey = Vdc - Vdc_est_k1;
if (ey > 0)          {      sgn_ey = 1;      }
else if (ey < 0)    {      sgn_ey = -1;     }
else                 {      sgn_ey = 0;     }

u = cntl_cc.Out/100;

// u = cntl_cc.Out/34;
if (u > 1)          {      u = 1;          }
else if (u < -1)   {      u = -1;         }

// select number of estimator
// First-order sliding-mode observer = 1
// Second-order sliding-mode observer = 2
// Average Current Estimator = 3

choose = 2;

if(choose == 3){
// Average Current Estimator

    if (count == 0){
        Vsa_k = Vdc;
    }

    if (count < 200) {
        Sum_A = Sum_A + Iac*u;
        count = count + 1;
    }
}

```

```

else if (count == 200){
    Sum_B = Sum_A/200;
    Vsa_k1 = Vdc - Vsa_k;
    Sum_C = (Cn*Vsa_k1)/0.01;
    Sum_A = 0;
    count = 0;
}
Idc_est_avg = Sum_B + Sum_C;
}

else if (choose == 1){

// First order Sliding-mode Observer

Vdc_est_k = Vdc_est_k1 + Ts*(((Idc_est_k1 - Iac*u)/Cn)+(h1*ey)
+ (k1*sgn_ey));
Idc_est_k = Idc_est_k1 + Ts*(h2*ey);
if (Idc_est_k < 0) { Idc_est_k = 0; }
Vdc_est_k1 = Vdc_est_k;
Idc_est_k1 = Idc_est_k;
}

else if (choose == 2){

// Second order Sliding-mode Observer

Vdc_est_k = Vdc_est_k1 + Ts*(((Idc_est_k1 - Iac*u)/Cn)+(h1*ey)
+ (k1*sqrt(abs(ey))*sgn_ey));
Idc_est_k = Idc_est_k1 + Ts*(k2*sgn_ey + h2*ey);

```

```

        if (Idc_est_k < 0)      {      Idc_est_k = 0; }
        Vdc_est_k1 = Vdc_est_k;
        Idc_est_k1 = Idc_est_k;
    }

    if (choose == 1 || choose == 2){
        if (Ts_count < 200) {
            Sum_Vdc_est = Sum_Vdc_est + Vdc_est_k;
            Sum_Idc_est = Sum_Idc_est + Idc_est_k;
            Ts_count = Ts_count + 1;
        }
        else if (Ts_count == 200){
            Vdc_est_avg = Sum_Vdc_est/200;
            Idc_est_avg = Sum_Idc_est/200;
            Sum_Vdc_est = 0;
            Sum_Idc_est = 0;
            Ts_count = 0;
        }
    }
    // Find average Idc and Vdc
    if (MPPTin_count < 200) {
        Sum_Vdc = Sum_Vdc + Vdc;
        Sum_Idc = Sum_Idc + Idc;
        MPPTin_count = MPPTin_count + 1;
    }

    else if (MPPTin_count == 200){

        Vdc_avg = Sum_Vdc/200;
        Idc_avg = Sum_Idc/200;
    }

```

```

Sum_Vdc = 0;
Sum_Idc = 0;
MPPTin_count = 0;

}

// if Period MPPT = 80 ms , must change 200 to 1600
// because 200 use Period MPPT = 10 ms

if(MPPT_count == 0){
    Vpv_k1 = Vdc_avg;
// Vpv_k1 = Vdc_ref;
    Ppv_k1 = Vdc_avg * Idc_est_avg;
// Ppv_k1 = Ppv_k; Idc_est_avg
    MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if(MPPT_count < 800){
    MPPT_count = MPPT_count + 1;
}
else if(MPPT_count == 800){
    Vpv_k = Vdc_avg;
    Ppv_k = Vdc_avg * Idc_est_avg; //
    Idc_est_avg , Idc_avg
    if((Ppv_k - Ppv_k1)>0)        {    sgn_Ppv = 1; }
    else if((Ppv_k - Ppv_k1)<0)  {    sgn_Ppv = -1; }
    else                          {
sgn_Ppv = 0; }
    if((Vpv_k - Vpv_k1)>0)        {    sgn_Vpv = 1; }
    else if((Vpv_k - Vpv_k1)<0)  {    sgn_Vpv = -1; }

```

```

else
sgn_Vpv = 0; }
Vdc_k = Vpv_k1 + 0.35*sgn_Ppv*sgn_Vpv;
Vdc_ref = Vdc_k;
if (Vdc_ref > 37) {Vdc_ref = 37;}
if (Vdc_ref < 28) {Vdc_ref = 28;}
MPPT_count = 0;
}

//Start SPLL module[In solar library, Texas instruments] >>>
spll1.AC_input = Vac_pu; // Set input for SPLL
SPLL_1ph_F_FUNC(&spll1); // Call SPLL MARCO
// SPLL MARCO Processed >>> OUTPUT: .cos[1], .sin[1]

//Start Voltage controller module >>>
cntl_vc.Vref = (Vdc_ref); // Input: Vdc reference
cntl_vc.Vfbk = (Vdc); // Input: Vdc feedback
cntl_vc.Umax = (20);
CNTL_VC_F_FUNC(&cntl_vc); // Call Voltage controller Function
// After CNTL_VC Processed >>> OUTPUT: .Out

Iac_ref = cntl_vc.Out*spll1.sin[1]; // Iac_ref = I*sin(wt)

//Start Current controller module >>>
cntl_cc.Vgrid = (Vac); // Input: Vac feedback
cntl_cc.Iref = (Iac_ref); // Input: Iac reference
cntl_cc.Ifbk = (Iac); // Input: Iac feedback
CNTL_CC_F_FUNC(&cntl_cc); // Call Current controller Function
// After CNTL_CC Processed >>> OUTPUT: .Out

```



```

#if DATA_LOG_ENABLE

        dval1= (spll1.sin[1]);
        dval2= (Vdc_avg);
        dval3= (Vdc_ref);

        DLOG_3CH_F_FUNC(&dlog_3ch);

//        dval1= (spll1.sin[1]);           // not edit
//        dval2= (Idc_avg);
//        dval3= (Idc_est_avg);
//        dval4= (Idc);
//        dval5= (Idc_est_k);
//        DLOG_5CH_F_FUNC(&dlog_5ch);

#endif

//-----

// ePWM module update
U_ref_P = PWM_CMPA_H - (cntl_cc.Out * 18.75);
U_ref_N = PWM_CMPA_H + (cntl_cc.Out * 18.75); //24.7565

// Unipolar Inverter - ePWM Prepare Setup
if(U_ref_P > PWM_CMPA_F)
{
    U_ref_P = (PWM_CMPA_F);
}

if(U_ref_P < 0)
{
    U_ref_P = 0;
}

if(U_ref_N > PWM_CMPA_F)
{

```

```

        U_ref_N = (PWM_CMPA_F);
    }
    if (U_ref_N < 0)
    {
        U_ref_N = 0;
    }
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = U_ref_P;           //
ePWM2A,ePWM2B update
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = U_ref_N;         //
ePWM3A,ePWM3B update

    LED_Count++;                               // LED
blink 0.5 s
    if (LED_Count == 10000)
    {
        GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO12 = 1;
        GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO31 = 1;
        GpioDataRegs.GPBTOGGLE.bit.GPIO34 = 1;
        LED_Count = 0 ;                       // Reset
    }
LED counter
    //-----
}

else
    // Switch A, Program mode 0 (default)
    {
        EALLOW;
        GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 0;   // OFF ePWM2A

```

```

GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 0;      // OFF ePWM2B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 0;      // OFF ePWM3A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 0;      // OFF ePWM3B
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO2 = 1;       // Clear GPIO2
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO2 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO3 = 1;       // Clear GPIO3
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO3 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO4 = 1;       // Clear GPIO4
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO4 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO5 = 1;       // Clear GPIO5
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO5 = 1;
EDIS;

// Reinitialize for next ADC sequence
AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reset SEQ1 to initial state
}

//-----
EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1; // Clear INT flag for this timer
// Acknowledge this interrupt to receive more interrupts from group 3
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;
//-----
}

//=====
==
// End of SourceCode.
//=====
==

```



ภาคผนวก ข

การปรับจูนค่าเกณฑ์ควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด คือลูปควบคุมชั้นใน มีตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่มีค่าเกนพี K_{pi} และค่าเกนไอ K_{li} และมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{op}(s) = \left(K_{pi} + \frac{K_{li}}{s} \right) \cdot \frac{1}{Ls} \quad (\text{ข.1})$$

และมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ

$$G_{cl}(s) = \frac{I_L(s)}{I_L^*(s)} = \frac{G_{op}(s)}{1 + G_{op}(s)} = \frac{K_{pi}s + K_{li}}{Ls^2 + K_{pi}s + K_{li}} \quad (\text{ข.2})$$

ทำให้ลูปควบคุมชั้นในมีโพลวงปิดสองโพลคือ

$$p_{1,2} = -\frac{K_{pi}}{2L} \pm \frac{1}{2L} \sqrt{K_{pi}^2 - 4K_{li}L} \quad (\text{ข.3})$$

และมีซีโรคือ

$$z = -\frac{K_{li}}{K_{pi}} \quad (\text{ข.4})$$

เนื่องจาก K_{pi} , K_{li} และ L มีค่าบวก ลูปควบคุมชั้นในจะมีโพลวงปิดทุกค่าที่เป็นค่าลบและมีเสถียรภาพ เมื่อ $K_{pi} = 100$, $K_{li} = 10$ และ $L = 5$ mH จะได้ว่าลูปควบคุมชั้นในมีโพลวงปิดคือ $p_1 \approx -0.1$ และ $p_2 \approx -20000$ และมีซีโรคือ $z = -0.1$ ทำให้โพล $p_1 \approx -0.1$ และซีโร $z = -0.1$ เกิดการหักล้างกัน ลูปควบคุมชั้นในจึงมีโพลวงปิดค่าเดียวคือ $p_2 \approx -20000$ ถ้า i_L^* ในสถานะอยู่ตัวมีความถี่ $f = 50$ Hz จะได้ว่า $\omega = 2\pi f \approx 314.16$ rad/s และ $s = j\omega = j314.16$ ทำให้ $G_{cl}(j314.16) = 0.9998 - j0.0157 \approx 1\angle(-0.9^\circ)$ นั่นคือ i_L มีมุมเฟสที่ตามหลัง e_s อยู่ 0.9° โดยประมาณ

ลูบควบคุมแรงดันดีซี คือลูบควบคุมชั้นนอก มีตัวควบคุมแรงดันดีซีที่มีค่าเกนพี K_{P_i} และค่าเกนไอ K_{I_i} และมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{op}(s) = \left(K_{P_v} + \frac{K_{I_v}}{s} \right) \cdot \frac{1}{Cs} \quad (\text{ข.5})$$

และมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ

$$G_{cl}(s) = \frac{V_{sa}(s)}{V_{sa}^*(s)} = \frac{G_{op}(s)}{1 + G_{op}(s)} = \frac{K_{P_v}s + K_{I_v}}{Cs^2 + K_{P_v}s + K_{I_v}} \quad (\text{ข.6})$$

ทำให้ลูบควบคุมชั้นในมีโพลวงปิดสองโพลคือ

$$p_{1,2} = -\frac{K_{P_v}}{2C} \pm \frac{1}{2C} \sqrt{K_{P_v}^2 - 4K_{I_v}C} \quad (\text{ข.7})$$

และมีซีโรคือ

$$z = -\frac{K_{I_v}}{K_{P_v}} \quad (\text{ข.8})$$

เนื่องจาก K_{P_v} , K_{I_v} และ C มีค่าบวก ลูบควบคุมชั้นนอกจะมีโพลวงปิดทุกค่าที่เป็นค่าลบและมีเสถียรภาพ เมื่อ $K_{P_v} = 0.1$, $K_{I_v} = 1$ และ $C = 1 \text{ mF}$ จะได้ว่าลูบควบคุมชั้นนอกมีโพลวงปิดคือ $p_1 \approx -11.257$ และ $p_2 \approx -88.73$ และมีซีโรคือ $z = -10$



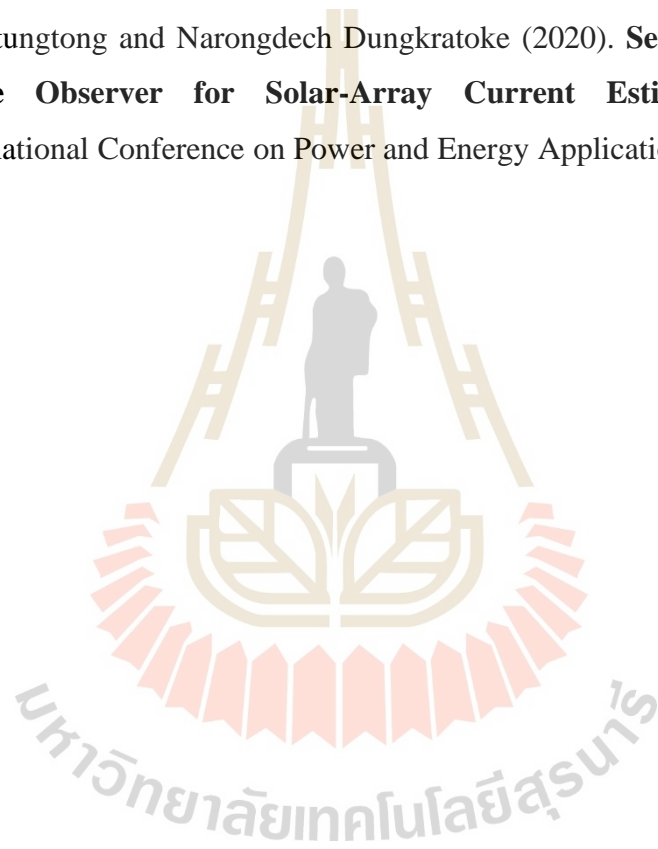
ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ณรงค์เดช ดึงกระโทก และ วิโรจน์ แสงรงทอง (2020). การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 : หน้าที่ 25 – 36.

Wirrote Sangtungong and Narongdech Dungkratoke (2020). **Second-Order Sliding-Mode Observer for Solar-Array Current Estimation**. IEEE 3rd International Conference on Power and Energy Applications : 1 – 5 pp.



การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี Estimation of Average Current Flowing out from DC Power Supply

ณรงค์เดช ดึงกระโทก¹ วิโรจน์ แสงธงทอง^{2*}

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ²อาจารย์ กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC)
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Narongdech Dungkratoke¹ Wirote Sangtungong^{2*}

¹Master student, ²Lecturer, Power electronics Energy Machines and Control research group,
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Email: cewirote@sut.ac.th

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ามีแผงพีวีที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังดีซี และต้องการเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี เพราะแผนการควบคุมจะใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีในการค้นหาจุดเอ็มพีพี บทความนี้จึงนำเสนอหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี และทบทวนตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี การสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีจุดประสงค์แทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังดีซี การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงพีวีจะทำให้เกิดความสะดวกในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อน ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจะแสดงถึงกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด

คำสำคัญ: หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตโหมดการเลื่อน แหล่งจ่ายกำลังดีซี

ABSTRACT

The control system of solar-energy conversion into electricity incorporates a PV panel served as DC power supply and needs a sensor sensing solar-array DC current. The control scheme utilizes the average of solar-array current for seeking a MPP of the PV panel. This paper presents the average-current estimator which computes the mean current flowing out from a DC power supply and also reviews the first-order sliding-mode observer which evaluates an instantaneous current that issues from the same DC power supply. The proposed estimator and the previous observer are formulated in order to further supplant such a sensor. When the PV panel is displaced by a single-phase rectifier, performance comparison between the estimator and the observer will be facilitated. Simulation and experiment results point out the closeness of the estimated and measured average currents.

Keyword: Average-current estimator, sliding-mode observer, DC power supply.

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงฟิว เป็นพลังงานสะอาด เพราะการผลิตไฟฟ้าของแผงฟิวไม่ปล่อยมลพิษถึงสิ่งแวดล้อมและชั้นบรรยากาศของโลก ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถติดตั้งแผงฟิวบนหลังคาบ้านหรือบนชั้นดาดฟ้าของตึกและอาคาร การใช้แผงฟิวผลิตไฟฟ้าจึงได้รับความนิยมและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อผู้ใช้ไฟฟ้าติดตั้งอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างแผงฟิวและกริดเอชของการไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถขายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงฟิวถึงการไฟฟ้าได้ เพราะอินเวอร์เตอร์จะบังคับการไหลของพลังงานไฟฟ้าจากแผงฟิว และป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้ากริดเอชหรือวงจรจ่าย นั่นคืออินเวอร์เตอร์จะบังคับกริดเอชให้เป็นไหลไฟฟ้า เนื่องจากแผงฟิวคือแหล่งจ่ายกำลังดีซีและกริดเอชคือระบบไฟฟ้าเอซี วิธีการแปลงกำลังงานดีซีไปเป็นกำลังงานเอซีที่ง่ายที่สุดคือการใช้อินเวอร์เตอร์ภาคเดียวที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อกับแผงฟิวและมีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อกับกริดเอช [1] แผนการควบคุมวงปิดหรือแผนการควบคุมป้อนกลับจะกำหนดฟังก์ชันการทำงานที่ถูกต้องของอินเวอร์เตอร์ ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อน จะประกอบด้วยแผนการควบคุมและอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว แผนการควบคุมนี้ต้องการเซนเซอร์ 4 ตัวที่ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงฟิว เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเอซีที่ไหลเข้ากริด เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอซี และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลออกจากแผงฟิว [2]

ในทางปฏิบัติ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุม [3] และไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันมีความรวดเร็วในการประมวลผลมากขึ้น และมีความง่ายและรีจิสเตอร์มากขึ้น แต่มีราคาถูกลง ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสามารถทำงานอื่น ๆ ได้เพิ่มเติม นอกเหนือจากการทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุม เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวสังเกตสถานะที่ประมาณค่าปริมาณทางกายภาพหรือปริมาณทางไฟฟ้า

บางปริมาณ ตัวสังเกตสถานะจะแทนที่เซนเซอร์บางตัว งานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีเพียงงานวิจัยเดียวได้พัฒนาตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง ที่ไหลออกจากแผงฟิว และใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงฟิว [4] การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าในวิธีการอื่นที่แตกต่างจากตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่หน่วยประมาณ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยโดยตรง เพราะแผนการควบคุมต้องการกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงฟิว นั่นคือการใช้งานตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่ ต้องเพิ่มเติมการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงฟิวจะก่อให้เกิดความง่ายและความสะดวกในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เพราะวงจรเรียงกระแสคือตัวอย่างหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังดีซี บทความนี้จะกล่าวถึงระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงฟิว หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย การทบทวนตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่ งานวิจัยก่อนหน้านี้ และการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

2. ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาาระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงฟิวได้รับแสงอาทิตย์และผลิตกำลังงานไฟฟ้าดีซี แผงฟิวจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซี (i_{pv}) และให้แรงดันดีซี (v_{pv}) ถึงตัวเก็บประจุ (C) และด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซี และอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าเอซี (i_g) ถึงกริดเอซี (v_g) ของการไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์มีด้านอินพุตที่มีแบบจำลองพลวัตคือ

$$\frac{dv_{pv}}{dt} = \frac{1}{C}(-i_g \cdot u + i_{pv}) \quad (1)$$

โดยที่ t คือเวลา

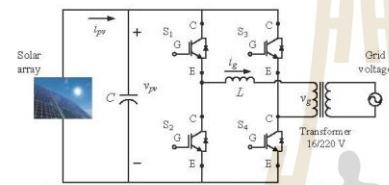
v_{pv} คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงโซลาร์เซลล์และตัวเก็บประจุ

i_{pv} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงโซลาร์เซลล์

i_g คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและไหลเข้ากริด

C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุ และ

$i_g \cdot u$ คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์



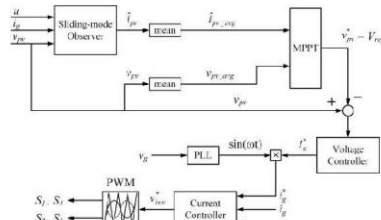
รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมตอกกริด

ระบบควบคุมดังกล่าวประกอบด้วยแผงโซลาร์อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีโถงพีที 4 ตัว (เอชบริดจ์) ตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อนานกับแผงโซลาร์ ตัวเหนี่ยวนำ (L) กริดเอช เซนเซอร์วัดแรงดันคัสที่ตกคร่อมแผงโซลาร์ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าย้อนที่ไหลเข้ากริด เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอช หน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดของแผงโซลาร์หรือเอ็มพีพีที (MPPT) หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยหรือตัวสังเกตโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมแรงดันคัสที่ตกคร่อมแผงโซลาร์หรือตัวควบคุมแรงดันคัสที่ เฟสล็อกกลูป (phase-locked loop : PLL) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอชหรือตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าย้อน และหน่วยมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือหน่วยที่ดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ตัวเก็บประจุจะรักษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแผงโซลาร์ให้มีความต่อเนื่องหรือทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดัน ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และกริดเอช จะรักษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าย้อนให้มีความ

ต่อเนื่องและมีความราบเรียบ (smooth) มากขึ้น หรือทำหน้าที่เป็นตัวกรองกระแสไฟฟ้า กริดเอชคือหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวของการไฟฟ้า เฟสล็อกกลูปได้รับแรงดันกริดเอชที่มีความถี่เชิงมุม ω ประมาณค่าตำแหน่งเชิงมุม (ωt) ของแรงดันกริดเอช และคำนวณค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมนี้ ($\sin(\omega t)$) ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนจะใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าคัสที่ไหลออกจากแผงโซลาร์ และทำหน้าที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง (i_{pv}) ที่ไหลออกจากแผงโซลาร์หรือกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงโซลาร์ การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (mean) จะประมวลกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งให้เป็นค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงโซลาร์ (i_{pv_avg}) ที่แสดงได้ในรูปที่ 2 แรงดันคัสที่ตกคร่อมแผงโซลาร์หรือแรงดันของแผงโซลาร์และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงโซลาร์ที่ได้จากการประมาณค่าในสถานะอยู่ตัว มีความพลัว (ripple) ที่มีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่ของแรงดันกริดเอช เอ็มพีพีทีที่ได้รับแรงดันเฉลี่ย (v_{pv_avg}) ที่ตกคร่อมแผงโซลาร์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (i_{pv_avg}) ที่ได้จากการประมาณค่าและนำค่าเฉลี่ยมาคำนวณหากำลังงานเฉลี่ยและค้นหาจุดเอ็มพีพีทีของแผงโซลาร์ การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งจะคำนวณได้ดังนี้

$$i_{pv_avg} = \frac{2}{T} \int_0^{0.5T} i_{pv} dt \quad (2)$$

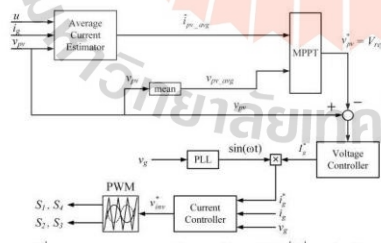
โดยที่ $T = \frac{1}{f}$ คือคาบระยะเวลาของแรงดันกริดเอช และ f คือความถี่ของแรงดันกริดเอช เอ็มพีพีทีจะได้รับ $v_{pv_avg}(k)$ และ $i_{pv_avg}(k)$ ที่เวลาการสุ่มปัจจุบัน โดยที่ k คือจำนวนครั้งของการวนซ้ำตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาปัจจุบัน



รูปที่ 2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดที่ใช้ตัวสังเกตโหมดการเลื่อน

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอาจจะใช้งานแทนที่เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ขั้วที่ไหลออกจากแผงโซลาร์เซลล์ของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดได้ ในรูปที่ 3 และป้อนค่าเฉลี่ยถึงเอ็มพีพีทีที่ค้นหาหรือคำนวณแรงดันดีซีอ้างอิงของแผงโซลาร์เซลล์ที่เชื่อมต่อกับกริดที่เชื่อมต่อกับกริด ตัวควบคุมแรงดันดีซีที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอตัวควบคุมแรงดันดีซีจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดีซีอ้างอิงและแรงดันที่ตกคร่อมแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากการวัด นำมาสร้างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง (i_g^*) ผลคูณระหว่างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและสัญญาณไซน์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งเชิงมุม ($\sin(\omega t)$) ของแรงดันกริดเอซี จะสร้างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง (i_g^*) ที่ซิงโครไนซ์ (synchronize) กับแรงดันกริดเอซี (v_g)

$$i_g^* = I_g^* \sin(\omega t) \quad (3)$$



รูปที่ 3 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดที่ใช้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอและการป้อนไปหน้า (feedforward) จะได้รับความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีที่ได้จากการวัด (i_g) และสร้างแรงดันอ้างอิงที่นำมาบวกกับแรงดันกริดเอซีที่ได้จากการวัด ผลบวกที่เกิดขึ้นคือแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ (v_{inv}^*)

$$v_{inv}^* = v_g + K_{P_i}(i_g^* - i_g) + K_{I_i} \int (i_g^* - i_g) dt \quad (4)$$

โดยที่ K_{P_i} และ K_{I_i} คือค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดตามลำดับ หน่วยที่ดับเบิลยูเอ็มชนิดขั้วเดียว (unipolar) จะนำแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณพหุสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง การเปรียบเทียบนี้จะสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลงได้ 4 สัญญาณ (S_1, S_2, S_3 และ S_4) และหน่วยที่ดับเบิลยูเอ็มจะป้อนสัญญาณพัลส์สี่ขาเกิดของไอจีบีทีแต่ละตัว สัญญาณพัลส์ 4 สัญญาณจะกำหนดลำดับและรูปแบบการสวิตช์ของไอจีบีที 4 ตัวที่ทำให้อินเวอร์เตอร์ผลิตแรงดันเอซีที่ดับเบิลยูเอ็ม ค่าบรรทัดฐาน (normalized value) ของแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ คือสถานะของการสวิตช์สมมูล (u)

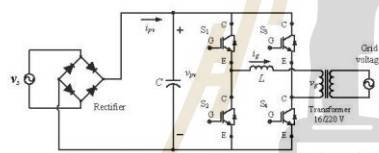
$$u = \frac{v_{inv}^*}{V_{oc,PR}} \quad (5)$$

โดยที่ $V_{oc,PR}$ คือแรงดันวงจรมืด (open-circuit voltage) ของแผงโซลาร์เซลล์ ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย จะได้รับสถานะของการสวิตช์สมมูลที่มีค่าอยู่ในช่วง $-1 \leq u \leq 1$

3. การใช้วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เป็นแผงโซลาร์เซลล์และแผนการควบคุม

เนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์คือแหล่งจ่ายกำลังดีซีและวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นเฟสเดียวให้แรงดันดีซี (v_{pv}) และจ่าย

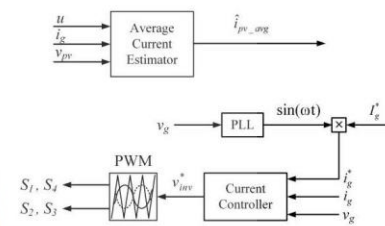
กระแสไฟฟ้าดีซี (i_{pv}) การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผง
 พีวีจะทำให้เกิดความสะดวกรวดในการทดลองเปรียบเทียบ
 สมรรถนะของตัวสังเกตโหมตการเลือนและหน่วย
 ปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เพราะวงจรเรียงกระแสมี
 ด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีหรือกริดเอซี
 แปลงแรงดันเอซีไปเป็นแรงดันดีซี และให้แรงดันเฉลี่ยที่มี
 ค่าคงที่และสัมพันธ์กับค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซี แต่
 แผงพีวีให้แรงดันดีซีเฉลี่ยและจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีเฉลี่ยที่
 ขึ้นอยู่กับระดับการถ่ายรังสีของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ
 แวดล้อม การรักษาแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมแผงพีวีให้มี
 ค่าคงที่เท่ากันทุกครั้งที่มีการทดลอง จึงมีความยุ่งยากและ
 ไม่สะดวก การรักษาแรงดันดีซีเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส
 ให้มีค่าคงที่เท่ากันทุกครั้งที่มีการทดลอง มีความง่ายและ
 สะดวกมากกว่า วงจรเรียงกระแสที่ใช้งานและแทนที่แผง
 พีวีแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรเรียงกระแสที่ใช้แทนที่แผงพีวี

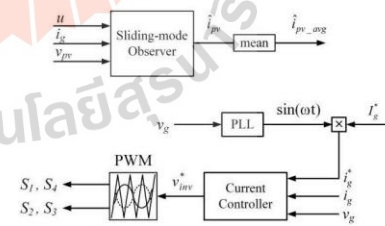
วงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีถึงตัวเก็บประจุ
 และด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ไอจีบีที 4 ตัวที่เชื่อมต่อ
 เป็นเอชบริดจ์ในอินเวอร์เตอร์ มีลำดับและรูปแบบการ
 สวิตซ์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงแรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส
 แผนการควบคุมจึงไม่เื่อมพีพีทีและตัวควบคุมแรงดันดีซี
 แต่มีเฟสล็อกกลุ๊ป ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และหน่วยพี
 ดับเบิลยูเอ็ม ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงจะมี
 ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ตัวสังเกตโหมตการเลือนและหน่วย
 ปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะไม่เป็นส่วนหนึ่งของ
 แผนการควบคุม เพราะกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจาก
 วงจรเรียงกระแสที่เกิดจากการคำนวณ (i_{pv_avg}) ไม่ได้
 นำมาใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด แผนการควบคุม
 อินเวอร์เตอร์หรือแผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและ

หน่วยประมาณ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณ
 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่านั้นจะแสดงได้ในรูปที่ 5 หน่วย
 ปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะได้รับแรงดันดีซีเอาต์พุต
 ของวงจรเรียงกระแส (v_{pv}) กระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการ
 วัด (i_g) และสถานะของการสวิตซ์สมมูล (u) และนำมาใช้
 คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (i_{pv_avg}) ของวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 5 แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
 และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์และตัวสังเกตโหมตการ
 เลือนที่ปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งเท่านั้นจะแสดง
 ได้ในรูปที่ 6 ตัวสังเกตโหมตการเลือนจะได้รับแรงดันดีซี
 เอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (v_{pv}) กระแสไฟฟ้ากริดที่ได้
 จากการวัด (i_g) และสถานะของการสวิตซ์สมมูล (u) และ
 นำมาใช้ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง (i_{pv}) ที่ไหล
 ออกจากวงจรเรียงกระแส การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะ
 ประมวลกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งให้เป็นค่าเฉลี่ยของ
 กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส (i_{pv_avg})



รูปที่ 6 แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
 และตัวสังเกตโหมตการเลือน

4. การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

แบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริด ได้นำมาใช้สร้างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย แต่ตัวสังเกตและหน่วยประมาณค่ามีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

4.1. หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

แหล่งจ่ายกำลังคือแผงพีวีและวงจรเรียงกระแสที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุและด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) การเฉลี่ยแบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ในช่วงระยะเวลาครึ่งคาบของแรงดันกริดเอซี จะสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี (i_{pv_avg}) ดังนี้

$$\hat{i}_{pv_avg} = \frac{\int_t^{t+0.5T} (i_g \cdot u) dt}{0.5T} + C \frac{v_{pv}(t+0.5T) - v_{pv}(t)}{0.5T} \quad (6)$$

โดยที่ v_{pv} คือแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายกำลังดีซีและตัวเก็บประจุ เมื่อ $f = 50 \text{ Hz}$ จะได้ว่า $0.5T = 10 \text{ ms}$ นั่นคือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยทุกช่วงเวลา 10 ms

4.2. ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่ง

งานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] พิจารณาแบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง v_{pv} , i_{pv} , i_g และ u และนำแบบจำลองพลวัตดังกล่าวมาสร้างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี การสร้างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนได้สมมติว่าแผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเกือบคงที่ ($\frac{di_{pv}}{dt} \approx 0$) ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่าหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนจะใช้แรงดันดีซี v_{pv} กระแสไฟฟ้าเอซี i_g ที่ได้จากการวัด และสถานะของ

การสวิตช์สมมูล u นำมาประมาณค่าแรงดันขณะหนึ่ง \hat{v}_{pv} ของแหล่งจ่ายกำลังดีซีและกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง \hat{i}_{pv} ที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี เมื่อพิจารณา \hat{v}_{pv} และ \hat{i}_{pv} เป็นตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่า i_g และ u คือตัวแปรอินพุต ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งที่มิโครงสร้างแบบวงปิด มีสมการปริภูมิสถานะ

$$\frac{d\hat{v}_{pv}}{dt} = \frac{1}{C}(-i_g \cdot u + \hat{i}_{pv}) + h_1 e_v + k_1 \text{sgn}(e_v)$$

$$\frac{d\hat{i}_{pv}}{dt} = h_2 e_v \quad (7)$$

$$e_v = v_{pv} - \hat{v}_{pv}$$

$$\text{sgn}(e_v) = \begin{cases} +1 & \text{if } e_v > 0 \\ 0 & \text{if } e_v = 0 \\ -1 & \text{if } e_v < 0 \end{cases}$$

โดยที่ \hat{v}_{pv} คือการประมาณค่าของ v_{pv} , \hat{i}_{pv} คือการประมาณค่าของ i_{pv} , h_1, k_1, h_2 คือค่าเกนของตัวสังเกตที่มีค่าบวก และ e_v คือความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าแรงดัน v_{pv} ที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายกำลังดีซี

5. ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลอง

การจำลองสถานการณ์และการทดลองจะแบ่งออกเป็นกรณีที่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส และกรณีในตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากรีจิสเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจะใช้ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซีอินเวอร์เตอร์ แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 1 การจำลองสถานการณ์มีขั้นเวลาคงที่ (fixed stepsize) 1 μs หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562

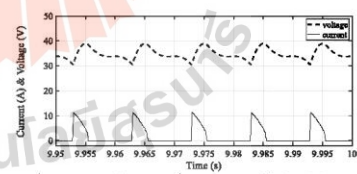
31

เฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีคาบระยะเวลาของการสุมวัด $50 \mu\text{s}$ (ความถี่ของการสุมวัด 20 kHz) แผนการควบคุมมีคาบระยะเวลาของการสุมวัด $50 \mu\text{s}$ ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงมีค่า 5 A ($I_g^* = 5 \text{ A}$) เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส จะทำหน้าที่เฝ้าตรวจ (monitor) กระแสไฟฟ้าและให้สัญญาณวัดเท่านั้น ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด (average actual current) จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณและการประมาณค่า และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (actual current) จะนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า

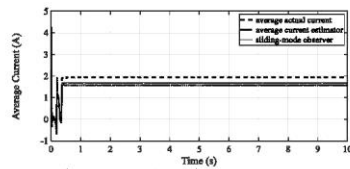
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และการทดลอง

แหล่งจ่ายกำลังซีซี	V_{pv_avg}	33 V _{DC}
อินเวอร์เตอร์	C	1000 μF
	L	5 mH
	$v_g(t) = 22.63 \sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS} 50 Hz
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุมวัด)	20 kHz
	I_g^*	5 A
ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	h_1	1000
	h_2	6000
	k_1	1000
ค่าเกนของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{PI}	100
	K_I	10

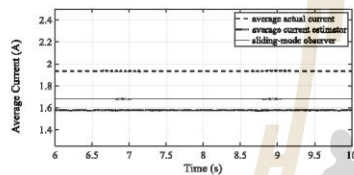
ในการจำลองสถานการณ์ การคำนวณสถานะของการสวิตช์สมมูลจะเลือกใช้ $V_{oc,pp} = 34 \text{ V}$ วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวให้แรงดันดีซีขณะหนึ่งที่มีความพลั้วที่มีความถี่ 100 Hz และมีค่าเฉลี่ย 33 V และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายพัลส์ (pulse) รายคาบที่มีค่ายอด (peak) 11 A โดยประมาณ และไม่ต่อเนื่องที่แสดงในรูปที่ 7 กระแสไฟฟ้าดีซีจะเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันถึงค่ายอดในแต่ละรอบ และมีค่าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.92 \text{ A}$ ในสถานะอยู่ตัว หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.58 \text{ A}$ ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนจะใช้ช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด 12 A ในแต่ละรอบที่แสดงในรูปที่ 10 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ติดตาม (track) การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 1.68 \text{ A}$ ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 8 และ 9 นั่นคือตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดมากกว่าในสถานะอยู่ตัว เพราะตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีโครงสร้างแบบวงปิด แต่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีโครงสร้างแบบวงเปิด



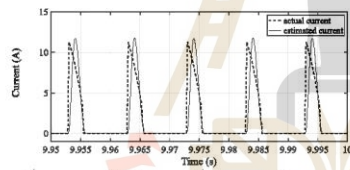
รูปที่ 7 แรงดันดีซีขณะหนึ่งและกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแส (ผลการจำลองสถานการณ์)



รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณของหน่วยประมาณ
ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และที่ได้จากการประมาณค่าของ
ตัวสังเกตใหม่ตกรเคลื่อน (ผลการจำลองสถานการณ์)

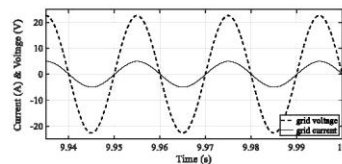


รูปที่ 9 การพิจารณารูปที่ 8 ในสถานะอยู่ตัว



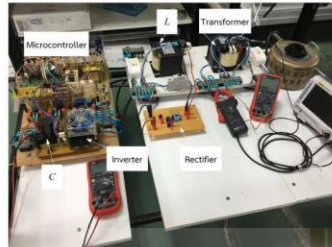
รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแสและ
ที่ได้จากประมาณค่าของตัวสังเกตใหม่ตกรเคลื่อน
(ผลการจำลองสถานการณ์)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_g) ที่มีค่ายอด 5 A โดยประมาณจะมีมุมเฟสที่ตรงกับหรือชิงไครโนซ์กับแรงดันกริดเอซี (v_g) ที่แสดงในรูปที่ 11 โดยแกนตั้งมีสเกล 10V/div (10 โวลต์ต่อช่อง) และ 10A/div (10 แอมแปร์ต่อช่อง) กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดมีความราบเรียบมาก และไม่มีสัญญาณยอดแหลม (spike) ดังนั้นกริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งและทำหน้าที่เหมือนกับโหลดตัวต้านทาน กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส

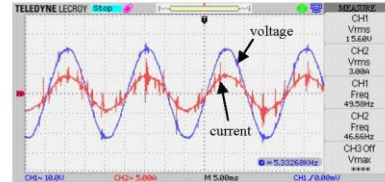


รูปที่ 11 แรงดันกริดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด
(ผลการจำลองสถานการณ์)

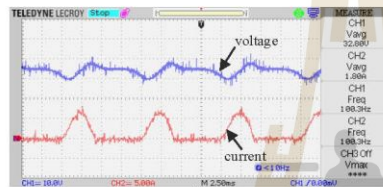
ชุดทดลองที่ใช้งานแสดงในรูปที่ 12 ในการทดลองการคำนวณสถานะของการสวิตช์สมมูลจะเลือกใช้ $V_{oc,PV} = 100$ V เพราะการคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและการประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ามีความผิดพลาดน้อย เมื่อพิจารณาการทดลองหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย วงจรเรียงกระแสให้แรงดันดีซีขณะหนึ่งที่มีความพลัฟที่มีความถี่ 100 Hz และมีค่าเฉลี่ย 32.8 V และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายครึ่งคลื่น (half wave) ระบายที่มีค่ายอด 6 A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 13 กระแสไฟฟ้าดีซีมีค่าเฉลี่ย $i_{pv,avg} \approx 1.8$ A และกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งใช้ช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในการเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดในแต่ละรอบ เพราะวงจรเรียงกระแสมีค่านินทรตที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีที่มีความเหนี่ยวนำกริด และหม้อแปลงแปรแรงดันได้หรือหม้อแปลงรวมขดลวดที่มีด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับกริดเอซีจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเอซี เช่นเซอร์วิตกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสให้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv,avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณ และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $i_{pv,avg} \approx 1.95$ A ที่แสดงในรูปที่ 14



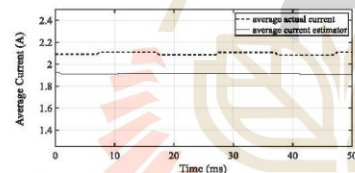
รูปที่ 12 ชุดทดลองวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 15 แรงดันกริด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) (ผลการทดลอง)

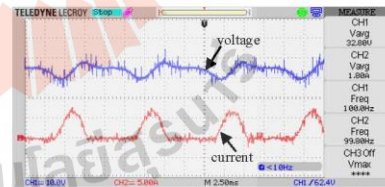


รูปที่ 13 แรงดันดีซีขณะหนึ่ง (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่ง (สีแดง) ของวงจรเรียงกระแส (ผลการทดลอง)



รูปที่ 14 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการคำนวณของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (ผลการทดลอง)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_g) ที่มีค่าอยู่ 4 A โดยประมาณจะมีมุมเฟสที่ตรงกับหรือซึ่งใคร่ในซีกกับแรงดันกริดเอซี (v_g) ที่มีค่าอยู่ 22 V โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 15 ดังนั้นกริดเอซีได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดมีสัญญาณยอดแหลม

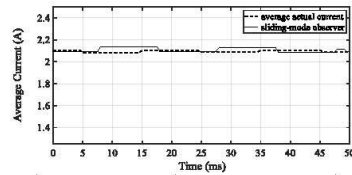


รูปที่ 16 แรงดันดีซีขณะหนึ่ง (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่ง (สีแดง) ของวงจรเรียงกระแส (ผลการทดลอง)

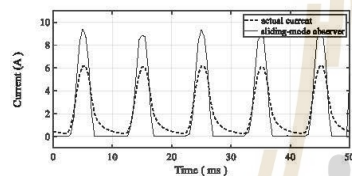
เมื่อพิจารณาการทดลองตัวสังเกตรวมการเคลื่อนอันตบหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสให้แรงดันดีซีขณะหนึ่งและจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่ 6 A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 16 กระแสไฟฟ้าดีซีมีค่าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.8$ A เช่นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสจะให้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 17 ตัวสังเกตรวมการเคลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่ 9 A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 18 แต่การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 17 ตัวสังเกตรวมการเคลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่มากกว่าค่าออกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส แต่มีค่าเฉลี่ยเกือบเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดที่แสดงในรูปที่ 17

34

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2562



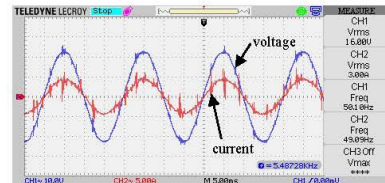
รูปที่ 17 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการทดลอง)



รูปที่ 18 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการทดลอง)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_g) ที่มีค่าอยู่ 4 A โดยประมาณจะมีมุมเฟสที่ตรงกับแรงดันกริดเอซี (v_g) ที่มีค่าอยู่ 22 V โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 19 ดังนั้นกริดได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดมีสัญญาณยอดแหลม เมื่อตัวสังเกตโหมดการเลื่อนได้รับกระแสไฟฟ้ากริดเอซี (i_g) ที่ได้จากการวัดสัญญาณยอดแหลมที่ปะปนในสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้ากริดจะมีผลกระทบต่อปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแส เนื่องจากตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีผลวัดของการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่รวดเร็ว สัญญาณยอดแหลมที่ปะปนในสัญญาณวัดอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

ผลการทดลองได้แสดงถึงตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 19 แรงดันกริด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) (ผลการทดลอง)

ที่มีความผิดพลาดมากกว่าแต่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่า เพราะหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยโดยตรง ผลการทดลองได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดิซี และผลการจำลองสถานการณ์จะสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลการจำลองสถานการณ์ให้การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและการประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่า กล่าวคือในผลการจำลองสถานการณ์ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาด 0.34 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 17%) ในผลการทดลอง หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาด 0.2 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 7%) และผลการจำลองสถานการณ์ ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาด 0.24 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 12%) ในผลการทดลอง ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาด 0.1 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 2%) ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจึงแสดงถึงความเป็นไปได้มากหรือน้อยเบื้องต้นในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

6. ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ และการประมาณค่าในการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์ วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชัณณะหนึ่ง i_{pv} ในลักษณะรายคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันจากศูนย์ถึงค่ายอด (peak) และลดลงอย่างต่อเนื่องถึงศูนย์ที่แสดงในรูปที่ 7 ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันดังกล่าวจะเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันดีซีชัณณะหนึ่ง v_{pv} มีค่าเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต่อเนื่องในเวลาเดียวกัน นั่นคือ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นค่าบวกอย่างฉับพลัน การเปลี่ยนแปลงของ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ อย่างฉับพลันอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดมากกว่า และตัวสังเกตใหม่การเคลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่า เช่นเดียวกัน

แต่ในการทดลอง วงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชัณณะหนึ่ง i_{pv} ในลักษณะรายคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากศูนย์ถึงค่ายอด (peak) ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และลดลงอย่างต่อเนื่องถึงศูนย์ที่แสดงในรูปที่ 13 และ 16 การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันดีซีชัณณะหนึ่ง v_{pv} มีค่าเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่อง นั่นคือ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นศูนย์และเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปเป็นค่าบวกอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงของ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ อย่างต่อเนื่องอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า และตัวสังเกตใหม่การเคลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า เช่นเดียวกัน เพราะหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตใหม่การเคลื่อนมีโครงสร้างที่พัฒนามาจากแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) ถ้าวางจรเรียงกระแส

จ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชัณณะหนึ่ง i_{pv} ที่มีความต่อเนื่อง และอินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่องที่ไหลเข้าด้านอินพุต $\frac{dv_{pv}}{dt}$ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่องแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) จะมีคำตอบหรือผลเฉลย (solution) ที่มีความเป็นได้อย่างเดียว (uniqueness) [5]

เมื่อวงจรรีจกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชัณณะหนึ่ง i_{pv} ที่มีความไม่ต่อเนื่องในการจำลองสถานการณ์ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) จะไม่มีเงื่อนไขลิปชิตซ์ (Lipschitz condition) ในเวลาเดียวกัน [5] ผลเฉลยจึงไม่มีความเป็นได้อย่างเดียว การใช้แบบจำลองพลวัตนี้คำนวณหากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (6) จึงมีความผิดพลาดมากกว่า และเมื่อวงจรรีจกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าชัณณะหนึ่งที่มีความไม่ต่อเนื่องหรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาก (อัตราค่าการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาสูงมาก) ตัวสังเกตใหม่การเคลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่าเช่นเดียวกัน

7. สรุป

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรรีจกระแสโดยตรง ตัวสังเกตใหม่การเคลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรรีจกระแส หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยให้ความผิดพลาดของการคำนวณค่าเฉลี่ยมากกว่า ตัวสังเกตใหม่การเคลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าให้ความผิดพลาดของการประมาณค่าเฉลี่ยน้อยกว่า ตัวสังเกตใหม่การเคลื่อนจึงมีสมรรถนะที่ดีกว่าสมรรถนะของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย แต่ผลการทดลองได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของวงจรรีจกระแสที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังดีซี ผลการจำลอง

สถานการณ์มีความใกล้เคียงโดยประมาณกับผลการทดลอง งานวิจัยต่อไปจะใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีในระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

- [5] Hassan K Khalil, *Nonlinear Systems*, Third Edition, Pearson Education Prentice-Hall International Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 2000.

8. กิตติกรรมประกาศ

การสร้างอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกริดได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเงินกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี และโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, A John Wiley & Sons Ltd, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, 2011.
- [2] ณรงค์เดช ตึงกระโทก และคณะ, "การควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกริดเฟสเดียว," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40, ชลบุรี, 15-17 พฤศจิกายน 2560, หน้า 146-149
- [3] ถาวร หินชูย และคณะ, "การควบคุมวงจรรอินเวอร์เตอร์ PWM เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกริดเอซซีด้วย TMS320F28335," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38, พระนครศรีอยุธยา, 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า 253-256
- [4] Kim, J.-S., and Youn, M.-J., " Variable-Structure Observer for Solar-Array Current Estimation in a Photovoltaic Power-Generation System," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 152(4), pp. 953-959, July 2005.

Second-Order Sliding-Mode Observer for Solar-Array Current Estimation

Narongdech Dungkratoke
 School of Electrical Engineering
 Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology (SUT)
 Nakhon Ratchasima, Thailand
 e-mail: M5940615_Narongdech@hotmail.com

Wirote Sangtungong
 School of Electrical Engineering
 Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology (SUT)
 Nakhon Ratchasima, Thailand
 e-mail: cewirote@sut.ac.th

Abstract—This article focuses on the second-order sliding-mode observer which online estimates solar-array current at distinct diversified values of its one gain. The above observer is incorporated into the control system of single-phase grid-connected PV inverter and it supplants the PV current sensor. The solar-array voltage, the grid current, and the status of four switches configured in H-bridge are transmitted to the state observer. Besides, the unique constituent based on super-twisting algorithm is integrated into the observer so that the solar-array current with high ripple is estimated certainly under a momentarily brief sampling-period. Ultimately, the performance enhancement of the current estimations will be studied when the one crucial gain of the observer varies.

Keywords—performance of estimation; second-order sliding-mode observer; single-phase grid-connected PV inverter; solar-array current observer

I. INTRODUCTION

The proliferation of electricity generation from altering solar energy has been recognized [1]. According to such an electricity production in small scale or microscale, photovoltaic (PV) modules are usually mounted on the rooftop of a residential building. The electrical energy which stems from sunlight is often transferred to utility grid through a single-phase inverter running as conversion from DC current into AC one. Feedback control strategy plays the two important roles of nearly-maximum power delivery and grid synchronization between grid voltage and grid current. Several sensors were adopted to attain the closed-loop control system that governed the single-phase PV inverter. Anyway, modern control approaches incline to reduce the number of sensors embodied in them because of saving cost [2]. The recent research explicated the first-order sliding-mode observer for solar-array current estimation [3]. This observer also known as variable-structure observer was able to replace the PV current sensor. However, the estimated solar-array current lagged behind the actual one. Other methodologies of PV current observer underlying control of the H-bridge inverter were rarely reported. When the concept of second-order sliding-mode being so-called super-twisting was devised [4], it will motivate formulation toward the solar-array current estimation executed by this technique. The super-twisting algorithm can attenuate the estimation lag. Another earlier research demonstrated the super-twisting

sliding-mode observer that estimated output capacitor voltage of differential boost inverter based PV system [5]. The lag of the voltage estimation was absent. Second-order sliding-mode control of single-phase voltage-source inverter was dealt with super-twisting notion [6]. The output AC voltage synchronized with its sinusoidal reference within small steady-state error. The grid current injected from single-phase grid-connected PV inverter was also handled by second-order sliding-mode control [7]. The better quality of the grid current was reached. The control law of second-order sliding-mode manipulated single-phase LCL-filtered grid-tied inverter [8]. The dynamic response of grid current was improved. Consequently, it is worth to innovate the solar-array current observer into second-order sliding-mode manner and perceive performance of the current estimations when the one principal gain of the observer differs.

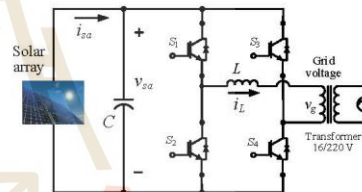


Figure 1. single-phase single-stage grid-tied H-bridge PV inverter.

II. THE OVERVIEW OF THE OVERALL SYSTEM

The pondered system shown in Fig. 1 is the single-phase single-stage H-bridge inverter whose input is attached to PV panel and a capacitor [3]. The output side of the same inverter is tied to an AC grid through an inductor. The type of such an inverter belongs to a voltage source inverter with switching pattern of PWM. The four IGBTs that constitute the inverter have switching sequence so that both DC voltage and current are converted into AC forms. When the inverter is able to supply grid current that synchronizes with grid voltage, the electric power will flow from the PV array into AC grid becoming a load with a unity power factor. The occurrence of the mentioned synchronization needs the specific feedback control system. This scheme holds MPPT, PLL, inner and outer control loops. The grid-current control

lies in the inner loop while the DC voltage control is situated at the outer loop.

The grid-current controller shown in Fig. 2 takes the error between the grid-current reference and the actual grid current. Then, the inverter voltage reference is determined by the summation between the monitored grid voltage and the output of the current controller. The phase-locked loop (PLL) extracts the electric angular position out of the monitored grid voltage. The grid-current reference is achieved by multiplying the grid-current peak reference and the electric angular position together. The DC voltage at the input side of the inverter is regulated by the DC voltage controller. It receives the error between the measured DC voltage and the DC voltage reference. The DC voltage controller will impart the grid-current peak reference to the multiplier. These two controllers both are structured to a PI one.

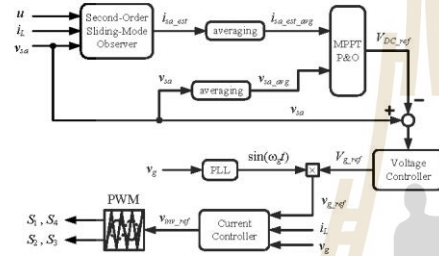


Figure 2. Control scheme of single-phase grid-tied PV inverter.

Maximum power point tracker (MPPT) seeks a maximum power point (MPP) over numerous I-V characteristic curves of PV panel. The MPP signifies the operating point which prescribes that a PV panel generates maximum power under an ambient condition. The perturb and observe (P&O) method is the sort of the MPPT exploited for an MPP prediction. The P&O utilizes the two averages of the measurable solar-array voltage and current in order to compute the average power arising. Later on it establishes the slope of the power-voltage curve that relies upon the average powers against the average voltages. The positive slope will raise the DC voltage reference whereas the negative one lowers it. Due to ripple of both the DC voltage across the capacitor and the DC current emitted from the PV array, the MPPT will evaluate the DC voltage reference near the voltage corresponding to MPP.

This grid-interfaced PV system must employ the four physical sensors comprising the solar-array voltage and current transducers as well as the grid voltage and current ones. The electric variable of interest turns into the solar-array current because the others become two feedback quantities and one feedforward quantity but the mean of the solar-array current is treated only as one of the two inputs onto the MPPT. Thereby the solar-array current is possibly regarded as the less critical one than the others. The usage

with the estimation of the solar-array current rather than sensing the real current allows the MPPT to derive the average value of the estimated current for the average-power computation. After considering the solar-array current as one state-variable, a way of reliable estimation for this variable will be performed by state observer.

III. THE PROPOSED SOLAR-ARRAY CURRENT OBSERVER

In the previous work the sliding-mode observer was developed to estimate the instantaneous solar-array current [3]. The observer was constructed to be first-order sliding-mode. It gave the precise average-value of the estimated current when compared to the average of the actual current with low or moderate ripple. The second-order sliding-mode observer is also available for solar-array current estimation. At a very short sampling-period it somewhat reconstructs accurately the current with high ripple. Its own proper gains affect accuracy of the estimation. Its main element concerns the dynamic model at the input side of the inverter. Using KCL on the upper node of the capacitor expresses

$$\frac{dv_{sa}}{dt} = \frac{1}{C}(-i_L \cdot u + i_{sa}) \quad (1)$$

$$\frac{di_{sa}}{dt} \approx \eta \quad (2)$$

$$y = v_{sa} \quad (3)$$

where C represents the capacitance of the capacitor, v_{sa} denotes the voltage across the capacitor and PV panel, i_{sa} stands for the solar-array current leaving out of the PV panel, η represents the rate of change of the solar-array current with respect to time, i_L denotes the grid current passing through the inductor, $i_L \cdot u$ stands for the current entering into the input side of the inverter, and u represents the status of switches arranged into the single-phase H-bridge inverter.

Whenever a high-side IGBT and a low-side one of different legs in the inverter conduct on-state while the other pair of IGBTs behave off-state and the solar-array voltage appears at the inverter output, $u = +1$. When the two pairs of IGBTs commute their states and the voltage polarity of the inverter output becomes reverse, $u = -1$. When both IGBTs at either high or low side keep on-state, $u = 0$. y denotes the plant output being the measurable solar-array voltage. The second-order sliding-mode observer is formulated as

$$\frac{d\hat{v}_{sa}}{dt} = \frac{1}{C}(-i_L \cdot u + \hat{i}_{sa}) + h_1 e_y + k_1 \sqrt{|e_y|} \operatorname{sgn}(e_y) \quad (4)$$

$$\frac{d\hat{i}_{sa}}{dt} = k_2 \operatorname{sgn}(e_y) + h_2 e_y \quad (5)$$

$$e_y = v_{sa} - \hat{v}_{sa} \quad (6)$$

$$\text{sgn}(e_y) = \begin{cases} +1 & ; e_y > 0 \\ 0 & ; e_y = 0 \\ -1 & ; e_y < 0 \end{cases} \quad (7)$$

where \hat{v}_{ss} stands for the estimated voltage across the capacitor and PV panel, \hat{i}_{ss} represents the estimated solar-array current being released from the PV panel, e_y denotes the error of the estimation on voltage across the PV panel, k_1 , k_2 , h_1 , and h_2 stand for the positive gains of the observer, and $\text{sgn}(\cdot)$ represents the signum function.

IV. THE ERROR BETWEEN THE PLANT AND THE OBSERVER

The discrepancy between the plant and its observer is written as

$$\dot{e}_y = \frac{de_y}{dt} = \frac{1}{C}e_i - h_1e_y - k_1\sqrt{|e_y|}\text{sgn}(e_y) \quad (8)$$

$$\dot{e}_i = \frac{de_i}{dt} = \eta - h_2e_y - k_2\text{sgn}(e_y) \quad (9)$$

where $e_i = \hat{i}_{ss} - \hat{i}_{ss}$ denotes the error of the estimation on the solar-array current. Stability of such a mismatch deserves to be analyzed further. Lyapunov function involving the analysis is chosen as

$$V = 2\frac{k_2}{C}|e_y| + \frac{h_2}{C}e_y^2 + \frac{1}{2C^2}e_i^2 + \frac{1}{2}\left(k_1\sqrt{|e_y|}\text{sgn}(e_y) + h_1e_y - \frac{1}{C}e_i\right)^2 \geq 0. \quad (10)$$

η is supposed to be finite. This declares $|\eta| \leq \delta$ where δ stands for a positive bound. Through differentiation, substitution, and a long algebraic derivation, the time derivative of the Lyapunov function manifests

$$\dot{V} = -\frac{1}{\sqrt{|e_y|}}\xi^T(\Omega_1 - \delta\Delta)\xi - \xi^T\Omega_2\xi < 0 \quad (11)$$

$$\text{where } \xi = \begin{bmatrix} \sqrt{|e_y|}\text{sgn}(e_y) \\ e_y \\ e_i \end{bmatrix}, \Delta = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{C} & -\frac{h_1}{2C} & \frac{1}{C^2} \\ -\frac{h_1}{2C} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C^2} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} k_1\left(\frac{k_1^2}{2} + \frac{k_2}{C}\right) & 0 & -\frac{k_1^2}{2C} \\ 0 & k_1\left(\frac{5h_1^2}{2} + \frac{h_2}{C}\right) & \frac{3h_1h_2}{2C} \\ -\frac{k_1^2}{2C} & -\frac{3h_1k_1}{2C} & \frac{k_1}{2C^2} \end{bmatrix}, \text{ and}$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} h_1\left(2k_1^2 + \frac{k_2}{C}\right) & 0 & 0 \\ 0 & h_1\left(h_1^2 + \frac{h_2}{C}\right) - \frac{h_1^2}{C} \\ 0 & -\frac{h_1^2}{C} & \frac{h_1}{C^2} \end{bmatrix}.$$

The observer gains of k_1 , k_2 , h_1 , and h_2 are adjusted

$$\text{so that } k_2 > \frac{h_1^2\delta^2}{2k_1^2(5h_1^2C + 2h_2)} - \frac{k_1^2C}{2} - \delta \text{ and}$$

$$k_1 > \frac{(5h_1^2C + 2h_2)(k_1^2C + 2\delta)^2 - \delta h_1^2C(6k_1^2C + 11\delta)}{4k_1^2C(h_1 - 2h_1^2C)} - \frac{k_1^2C}{2} - \delta$$

with $h_2 > 2h_1^2C$, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $h_1 > 0$, and $h_2 > 0$. The matrices $\Omega_1 - \delta\Delta$ and Ω_2 both retain positive-definiteness. The \dot{V} gets negative-definite and the V is positive-definite. Thus the V declines and the errors of the estimation decay ($e_y \rightarrow 0$ and $e_i \rightarrow 0$). The difference between the plant and its observer is asymptotically stable.

The solar-array current containing predominant ripple possesses a rather large δ because its rising and falling variations are speedy in each cycle. The two inequalities suggested for gain adjustment imply that k_2 depends upon δ . All the reasonable gains of the observer give rise to consistently good performance of state-variable estimations. However, the merely substantial k_2 gain satisfies such two inequalities whereas the identical considerable k_2 gain leads to the stiff estimation that goes numerically unstable [9]. The huge k_2 gain is impossible for a practical application while the two inequalities disobey the fair k_2 gain. They seem unrealizable and ignorance of them does not reflect on failure of the estimation. Nevertheless, they indicate that the k_2 gain should be as much as possible. The performance of solar-array current estimation owing to various k_2 gains will be further examined through simulation and infinitesimal sampling-period of the observer.

V. PERFORMANCE OF THE SOLAR-ARRAY CURRENT ESTIMATIONS

The grid-linked PV control system conveys its key parameters as follows: The numerals of 1000, 1000, and 6000 are assigned to the gains of k_1 , h_1 , and h_2 , respectively. The proportional and integral gains of the voltage controller are tuned to 0.1 and 1, respectively while the proportional and integral gains of the current controller are tuned to 100 and 10, respectively. The shift step of the MPPT is selected at 0.35. The capacitor and inductor feature the capacitance of 1 mF and the inductance of 5 mH, respectively. The unipolar pulse-width modulator includes the triangular carrier signal with frequency of 20 kHz. The comparison between the per-unit of the inverter voltage reference and the carrier signal will produce four gate-drive signals. The AC grid equips sinusoidal voltage at 16 V_{rms} 50 Hz. The incident irradiance

at 1000 W/m^2 strikes the surface of the PV panel. The entire control scheme accompanies with the sampling period at $50 \mu\text{s}$ except the MPPT and the observer. The sampling periods of the MPPT and the observer are brought into 80 ms and $1 \mu\text{s}$, respectively. All the initial estimations of the observer are predetermined at zero. The stepsize applied throughout all the simulations is fixed at $1 \mu\text{s}$.

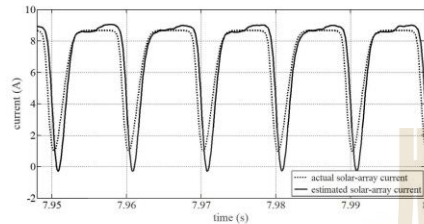


Figure 3. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 1.

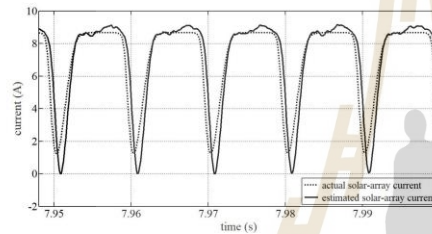


Figure 4. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 500.

When the observer obtains the k_2 gain at 1, the estimation of the solar-array current affords undershoot, overshoot, and slight lag in regard to the actual current shown in Fig. 3. Nonetheless, the shape of the estimation is commensurate with the waveform of the actual one. At the k_2 gain of 500 the estimation shown in Fig. 4 resembles the preceding one while minute ringing transpires. Thereafter, with the k_2 gain of 1000 the ringing shown in Fig. 5 increases trivially. Afterwards, at the k_2 gain of 3000 the ringing shown in Fig. 6 becomes softly more plain. Subsequently, with the k_2 gain of 6000 a retardation in the estimation shown in Fig. 7 diminishes while the ringing is upward prominent. At the k_2 gain of 8000 the lag of the estimation shown in Fig. 8 disappears while the ringing is appreciable. With the k_2 gain of 12000 the ringing shown in Fig. 9 is noticeable and at the k_2 gain of 18000 the ringing shown in Fig. 10 grows apparent. Therefore, the proposed observer is able to estimate the solar-array current over diverse k_2 gains. A greater k_2 gain renders faster estimation with more intense ringing. Subject to this circumstance a trade-off between

fidelity of the estimation and the minor ringing content notifies the k_2 gain of 6000.

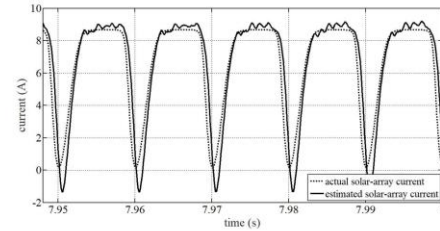


Figure 5. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 1000.

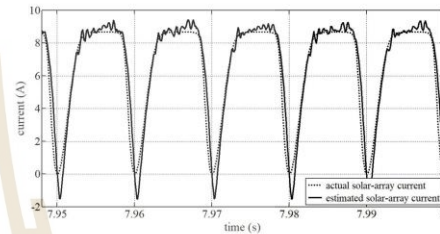


Figure 6. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 3000.

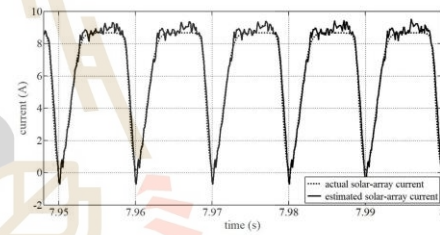


Figure 7. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 6000.

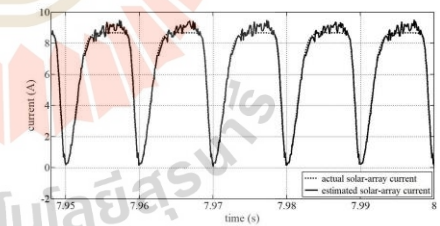


Figure 8. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 8000.

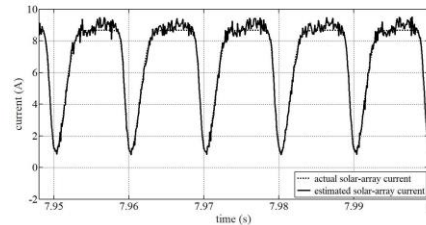


Figure 9. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 12000.

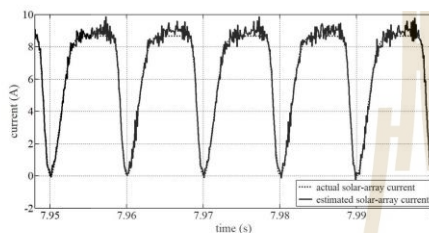


Figure 10. Actual and estimated solar-array currents at the k_2 gain of 18000.

VI. CONCLUSION

Although the solar-array current combines high ripple, the second-order sliding-mode observer still estimates it effectively. Stability of the deviation between the plant and the observer is asserted by sufficiently vast k_2 gain. However, the fine compatibility of the ringing content and performance of the current estimation informs the appropriate k_2 gain. When the estimation remains adequately rapid and the ringing occurs within narrow limits, the observer will be equivalent to the current sensor and then the

closed-loop control system can maintain its functionality. It is anticipated that the foregoing observer with an extremely short sampling-period will be implemented by a sophisticated microcontroller.

REFERENCES

- [1] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, John Wiley and Sons: 2011.
- [2] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed., Prentice Hall: 2010.
- [3] I.-S. Kim and M.-J. Youn, "Variable-Structure Observer for Solar-Array Current Estimation in a Photovoltaic Power-Generation System," *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 152, no. 4, July, 2005, pp. 953-959, doi: 10.1049/ip-epa:20045245.
- [4] Jaime A. Moreno and Marisol Osorio, "A Lyapunov Approach to Second-Order Sliding Mode Controllers and Observers," *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Cancun, Mexico, 9-11 December 2008, pp. 2856-2861, doi: 10.1109/CDC.2008.4739356.
- [5] Akshaya K. Pati and N. C. Sahoo, "Super-Twisting Sliding Mode Observer for Grid-Connected Differential Boost Inverter Based PV System," *Proceedings of the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Lisbon, Portugal, 14-17 October 2019, pp. 4025-4030, doi: 10.1109/IECON.2019.8927626.
- [6] Satish K. Gudey and Rajesh Gupta, "Second Order Sliding Mode Control for a Single Phase Voltage Source Inverter," *Proceedings of the 2014 IEEE Region 10 International Conference (TENCON 2014)*, Bangkok, Thailand, 22-25 October 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/TENCON.2014.7022439.
- [7] Bin Guo, Mei Su, Yao Sun, Hui Wang, Hanbing Dan, Zhongting Tang, and Bin Cheng, "A Robust Second-Order Sliding Mode Control for Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected Voltage Source Inverter," *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 53202-53212, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912033.
- [8] Bin Guo, Mei Su, Hui Wang, Zhongting Tang, Yuefeng Liao, Lei Zhang, and Shuqi Shi, "Observer-Based Second-Order Sliding Mode Control for Grid-Connected VSI with LCL-Type Filter under Weak Grid," *Electric Power Systems Research*, vol. 183, June, 2020, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106270>.
- [9] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, 7th ed., McGraw-Hill Education: 2015.

ประวัติผู้เขียน

นายณรงค์เดช ดึงกระโทก เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาในระดับระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนโชคชัยสามัคคี จังหวัดนครราชสีมา ในปีพ.ศ.2555 และสำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ.2559 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ในกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และได้ปฏิบัติหน้าที่ ผู้สอนรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่

- (1) ปฏิบัติการระบบควบคุม
- (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า
- (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน

ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในด้าน ระบบควบคุม การเชื่อมต่อกริดไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี