

การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี

Estimation of Average Current Flowing out from DC Power Supply

ณรงค์เดช ดึงกระโทก¹ วิโรจน์ แสงธทอง^{2*}

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

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

Narongdech Dungkratoke¹ Wirote Sangtungton^{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 และทบทวนตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี การสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีจุดประสงค์แทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังดีซี การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงพีวีจะทำให้เกิดความสับสนในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อน 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

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวี เป็นพลังงานสะอาด เพราะการผลิตไฟฟ้าของแผงพีวีไม่ปล่อยมลพิษถึงสิ่งแวดล้อมและชั้นบรรยากาศของโลก ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถติดตั้งแผงพีวีบนหลังคาบ้านหรือบนชั้นดาดฟ้าของตึกและอาคาร การใช้แผงพีวีผลิตไฟฟ้าจึงได้รับความนิยมและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อผู้ใช้ไฟฟ้าติดตั้งอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกลางระหว่างแผงพีวีและกริดเอซีของการไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถขายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีถึงการไฟฟ้าได้ เพราะอินเวอร์เตอร์จะบังคับการไหลของพลังงานไฟฟ้าจากแผงพีวี และป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้ากริดเอซีหรือวงจรขาย นั่นคืออินเวอร์เตอร์จะบังคับกริดเอซีให้เป็นโหลดไฟฟ้า เนื่องจากแผงพีวีคือแหล่งจ่ายกำลังดีซีและกริดเอซีคือระบบไฟฟ้าเอซี วิธีการแปลงกำลังงานดีซีไปเป็นกำลังงานเอซีที่ง่ายที่สุดคือการใช้อินเวอร์เตอร์ภาคเดียวที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อกับแผงพีวีและมีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อกับกริดเอซี [1] แผนการควบคุมวงปิดหรือแผนการควบคุมป้อนกลับจะกำหนดฟังก์ชันการทำงานที่ถูกต้องของอินเวอร์เตอร์ ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อน จะประกอบด้วยแผนการควบคุมและอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว แผนการควบคุมนี้ต้องการเซนเซอร์ 4 ตัวที่ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงพีวี เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเอซีที่ไหลเข้ากริด เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอซีและเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลออกจากแผงพีวี [2]

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

บางปริมาณ ตัวสังเกตสถานะจะแทนที่เซนเซอร์บางตัว งานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีเพียงงานวิจัยเดียวได้พัฒนาตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงพีวี และใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี [4] การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าในวิธีการอื่นที่แตกต่างจากตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่คือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยโดยตรง เพราะแผนการควบคุมต้องการกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงพีวี นั่นคือการใช้งานตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่เพิ่มเติมการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงพีวีจะทำให้เกิดความง่ายและความสะดวกในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เพราะวงจรเรียงกระแสคือตัวอย่างหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังดีซี บทความนี้จะกล่าวถึงระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า การใช้งานวงจรเรียงกระแสแทนที่แผงพีวี หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย การทบทวนตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

2. ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวีได้รับแสงอาทิตย์และผลิตกำลังงานไฟฟ้าดีซี แผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซี (i_{pv}) และให้แรงดันดีซี (v_{pv}) ถึงตัวเก็บประจุ (C) และด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีและอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าเอซี (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

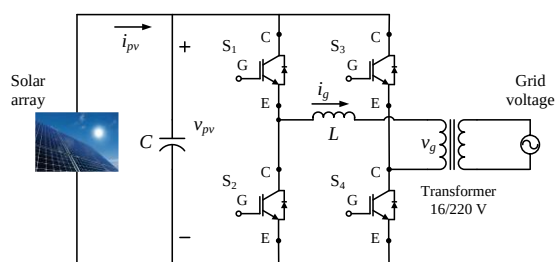
v_{pv} คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและตัวเก็บประจุ

i_{pv} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี

i_g คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและไหลเข้ากริด

C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุ และ

$i_g \cdot u$ คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์



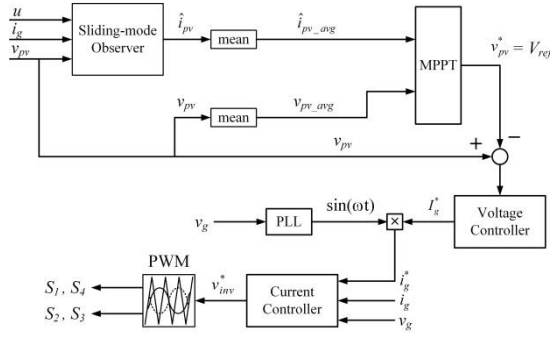
รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด

ระบบควบคุมดังกล่าวประกอบด้วยแผงพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีไอจีบีที 4 ตัว (เซมิบริดจ์) ตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับแผงพีวี ตัวเหนี่ยวนำ (L) กริดเอซี เซนเซอร์วัดแรงดันดิซีสที่ตกคร่อมแผงพีวี เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเอซีที่ไหลเข้ากริด เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอซี หน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีหรือเอ็มพีพีที (MPPT) หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยหรือตัวสังเกตโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมแรงดันดิซีสที่ตกคร่อมแผงพีวีหรือตัวควบคุมแรงดันดิซีส เฟสล็อกกลูป (phase-locked loop : PLL) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีหรือตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และหน่วยมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ตัวเก็บประจุจะรักษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแผงพีวีให้มีความต่อเนื่องหรือทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดัน ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และกริดเอซี จะรักษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ากริดให้มีความ

ต่อเนื่องและมีความราบเรียบ (smooth) มากขึ้น หรือทำหน้าที่เป็นตัวกรองกระแสไฟฟ้า กริดเอซีคือหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวของการไฟฟ้า เฟสล็อกกลูปได้รับแรงดันกริดเอซีที่มีความถี่เชิงมุม ω ประมาณค่าตำแหน่งเชิงมุม (ωt) ของแรงดันกริดเอซี และคำนวณค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมนี้ ($\sin(\omega t)$) ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนจะใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดิซีสที่ไหลออกจากแผงพีวี และทำหน้าที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง ($\hat{i}_{pv}$) ที่ไหลออกจากแผงพีวีหรือกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวี การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (mean) จะประมวลกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งให้เป็นค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี ($\hat{i}_{pv_avg}$) ที่แสดงได้ในรูปที่ 2 แรงดันดิซีสที่ตกคร่อมแผงพีวีหรือแรงดันของแผงพีวีและกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่าในสถานะอยู่ตัว มีความพลัว (ripple) ที่มีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่ของแรงดันกริดเอซี เอ็มพีพีทีที่ได้รับแรงดันเฉลี่ย (v_{pv_avg}) ที่ตกคร่อมแผงพีวี และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ($\hat{i}_{pv_avg}$) ที่ได้จากการประมาณค่าและนำค่าเฉลี่ยมาคำนวณหาค่าพลังงานเฉลี่ยและค้นหาจุดเอ็มพีพีของแผงพีวี การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งจะคำนวณได้ดังนี้

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

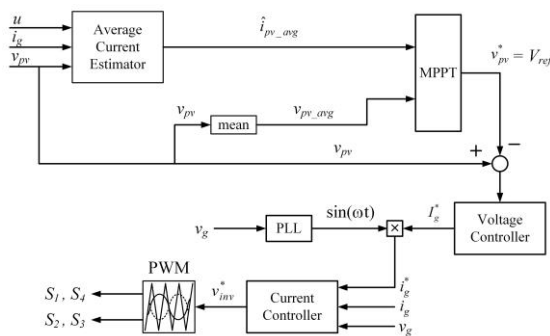
โดยที่ $T = \frac{1}{f}$ คือคาบระยะเวลาของแรงดันกริดเอซี และ f คือความถี่ของแรงดันกริดเอซี เอ็มพีพีทีจะได้รับ $v_{pv_avg}(k)$ และ $\hat{i}_{pv_avg}(k)$ ที่เวลาการสุ่มปัจจุบัน โดยที่ k คือจำนวนครั้งของการวนซ้ำตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาปัจจุบัน



รูปที่ 2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกิต
ที่ใช้ตัวสังเกตโหมดการเลื่อน

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอาจจะใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยตรงที่แสดงได้ในรูปที่ 3 และป้อนค่าเฉลี่ยถึงเอ็มพีพีทีที่ค้นหาหรือคำนวณแรงดันดีซีอ้างอิงของแผงพีวี เอ็มพีพีทีจะป้อนแรงดันดีซีอ้างอิงถึงตัวควบคุมแรงดันดีซีที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอตัวควบคุมแรงดันดีซีจะใช้เวลาผิดพลาดระหว่างแรงดันดีซีอ้างอิงและแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด 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 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกิต
ที่ใช้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

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

$$v_{inv}^* = v_g + K_{pi}(i_g^* - i_g) + K_{li} \int_0^t (i_g^* - i_g) dt \quad (4)$$

โดยที่ K_{pi} และ K_{li} คือค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดตามลำดับ หน่วยพิตดับเบิลยูเอ็มชนิดขั้วเดียว (unipolar) จะนำแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง การเปรียบเทียบนี้จะสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลงได้ 4 สัญญาณ (S_1, S_2, S_3 และ S_4) และหน่วยพิตดับเบิลยูเอ็มจะป้อนสัญญาณพัลส์ถึงขาเกตของไอจีบีทีแต่ละตัว สัญญาณพัลส์ 4 สัญญาณจะกำหนดลำดับและรูปแบบการสวิตช์ของไอจีบีที 4 ตัวที่ทำให้อินเวอร์เตอร์ผลิตแรงดันเอซีพิตดับเบิลยูเอ็ม ค่าบรรทัดฐาน (normalized value) ของแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ คือสถานะของการสวิตช์สมมูล (u)

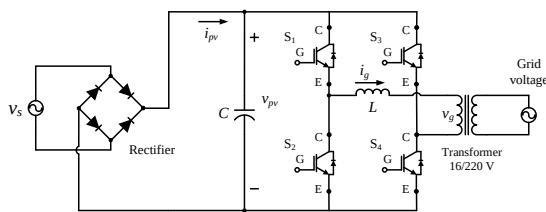
$$u = \frac{v_{inv}^*}{V_{oc, PV}} \quad (5)$$

โดยที่ $V_{oc, PV}$ คือแรงดันวงจรเปิด (open-circuit voltage) ของแผงพีวี ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย จะได้รับสถานะของการสวิตช์สมมูลที่มีค่าอยู่ในช่วง $-1 \leq u \leq 1$

3. การใช้วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เป็นแผงพีวี และแผนการควบคุม

เนื่องจากแผงพีวีคือแหล่งจ่ายกำลังดีซีและวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นเฟสเดียวให้แรงดันดีซี (v_{pv}) และจ่าย

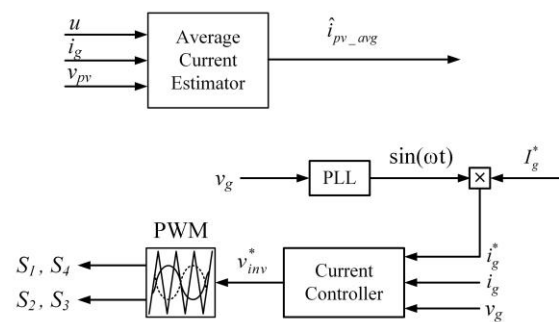
กระแสไฟฟ้าดีซี (i_{pv}) การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงพีวีจะทำให้เกิดความสับสนในการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เพราะวงจรเรียงกระแสมีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีหรือกริดเอซี แปลงแรงดันเอซีไปเป็นแรงดันดีซี และให้แรงดันเฉลี่ยที่มีค่าคงที่และสัมพันธ์กับค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซี แต่แผงพีวีให้แรงดันดีซีเฉลี่ยและจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีเฉลี่ยที่ขึ้นอยู่กับระดับการถ่ายรังสีของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม การรักษาระดับแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมแผงพีวีให้มีค่าคงที่เท่ากันทุกครั้งที่ในการทดลอง จึงมีความยุ่งยากและไม่สะดวก การรักษาระดับดีซีเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสให้มีค่าคงที่เท่ากันทุกครั้งที่ในการทดลอง มีความง่ายและสะดวกมากกว่า วงจรเรียงกระแสที่ใช้งานและแทนที่แผงพีวีแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรเรียงกระแสที่ใช้งานแทนที่แผงพีวี

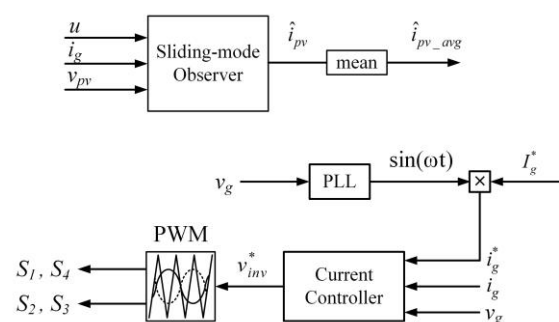
วงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีถึงตัวเก็บประจุและด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ไอจีบีที 4 ตัวที่เชื่อมต่อเป็นเฮกซ์บริดจ์ในอินเวอร์เตอร์ มีลำดับและรูปแบบการสวิตช์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงแรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส แผนการควบคุมจึงไม่มีเอ็มพีพีทีและตัวควบคุมแรงดันดีซี แต่มีเฟสล็อกกลูบ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะไม่ใช่เป็นส่วนหนึ่งของแผนการควบคุม เพราะกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสที่เกิดจากการคำนวณ ($\hat{i}_{pv_avg}$) ไม่ได้นำมาใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์หรือแผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและ

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่านั้นจะแสดงได้ในรูปที่ 5 หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะได้รับแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (v_{pv}) กระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด (i_g) และสถานะของการสวิตช์สมมูล (u) และนำมาใช้คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ($\hat{i}_{pv_avg}$) ของวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 5 แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์และตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งเท่านั้นจะแสดงได้ในรูปที่ 6 ตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนจะได้รับแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (v_{pv}) กระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด (i_g) และสถานะของการสวิตช์สมมูล (u) และนำมาใช้ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง ($\hat{i}_{pv}$) ที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะเป็นค่าเฉลี่ยของประมวลกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งให้เป็นค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส ($\hat{i}_{pv_avg}$)



รูปที่ 6 แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและตัวสวิตช์โหมดการเลื่อน

4. การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

แบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริด ได้นำมาใช้สร้างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย แต่ตัวสังเกตและหน่วยประมาณค่ามีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

4.1. หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

แหล่งจ่ายกำลังคือแผงพีวีและวงจรเรียงกระแสที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุและด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) การเฉลี่ยแบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ในช่วงระยะเวลาครึ่งคาบของแรงดันกริดเอซี จะสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลัง ($\hat{i}_{pv_avg}$) 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} คือแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายกำลังและตัวเก็บประจุ เมื่อ $f = 50 \text{ Hz}$ จะได้ว่า $0.5T = 10 \text{ ms}$ นั่นคือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยทุกช่วงระยะเวลา 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

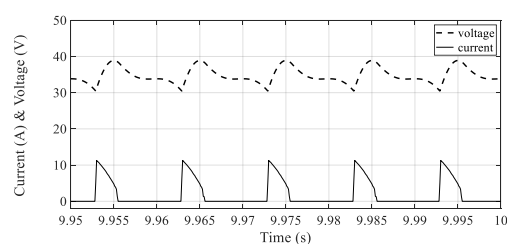
การจำลองสถานการณ์และการทดลองจะแบ่งออกเป็นกรณีที่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส และกรณีที่ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกวงจรเรียงกระแส ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจะใช้ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซีอินเวอร์เตอร์ แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 1 การจำลองสถานการณ์มีขั้นเวลาคงที่ (fixed stepsize) $1 \mu\text{s}$ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

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

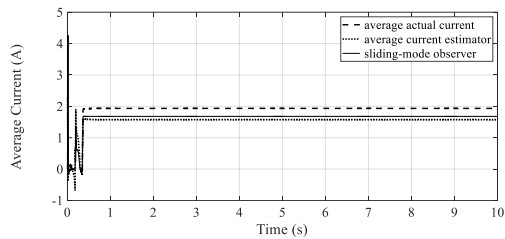
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และการทดลอง

แหล่งจ่ายกำลังดีซี	v_{pv_avg}	33 V_{DC}
อินเวอร์เตอร์	C	$1000 \mu\text{F}$
	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_{Ii}	10

ในการจำลองสถานการณ์ การคำนวณสถานะของการสวิตช์สมมูลจะเลือกใช้ $V_{oc,pv} = 34 \text{ V}$ วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวให้แรงดันดีซีขณะหนึ่งที่มีความพลัวที่มีความถี่ 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

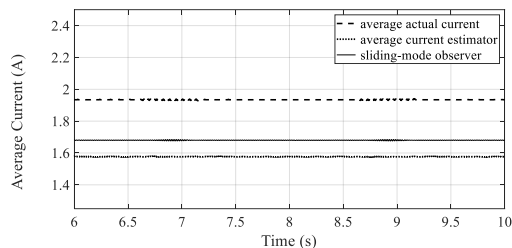


รูปที่ 7 แรงดันดีซีขณะหนึ่งและกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแส (ผลการจำลองสถานการณ์)

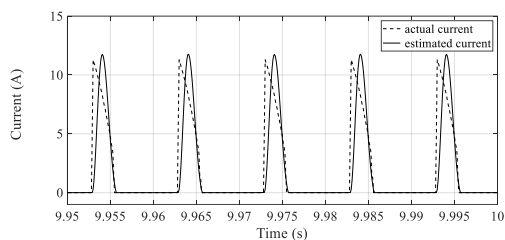


รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการจำลองสถานการณ์)

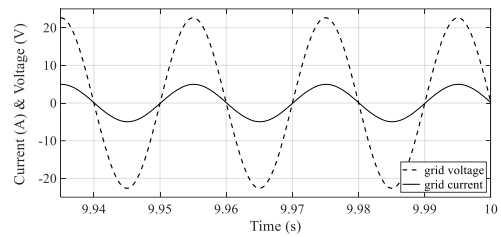


รูปที่ 9 การพิจารณารูปที่ 8 ในสถานะอยู่ตัว



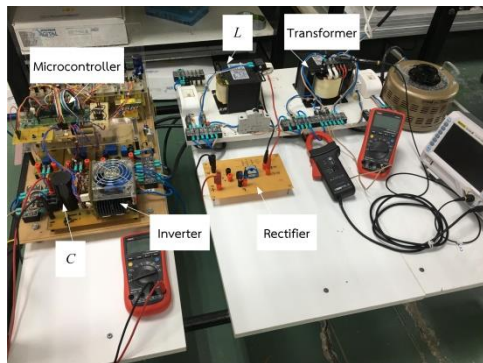
รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแสและที่ได้จากประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการจำลองสถานการณ์)

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

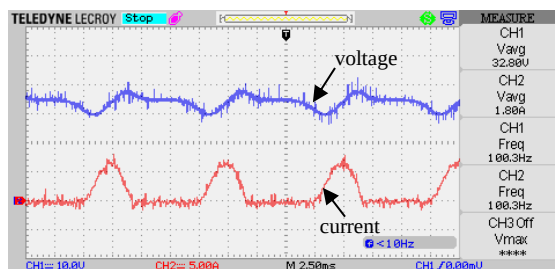


รูปที่ 11 แรงดันกริดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (ผลการจำลองสถานการณ์)

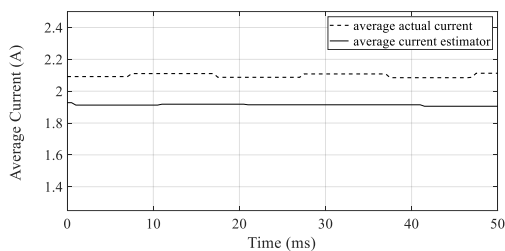
ชุดทดลองที่ใช้งานแสดงในรูปที่ 12 ในการทดลองการคำนวณสถานะของการสวิตช์สมมูลจะเลือกใช้ $V_{oc,PV} = 100$ V เพราะการคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและการประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ามีความผิดพลาดน้อย เมื่อพิจารณาการทดลองหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย วงจรเรียงกระแสให้แรงดันดีซีขั้วหนึ่งที่มีความพลัฟที่มีความถี่ 100 Hz และมีค่าเฉลี่ย 32.8 V และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขั้วหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายครึ่งคลื่น (half wave) รายคาบที่มีค่ายอด 6 A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 13 กระแสไฟฟ้าดีซีมีค่าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.8$ A และกระแสไฟฟ้าดีซีขั้วหนึ่งใช้ช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในการเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดในแต่ละรอบ เพราะวงจรเรียงกระแสมีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีที่มีความเหนี่ยวนำกริด และหม้อแปลงแปรแรงดันได้หรือหม้อแปลงรวมขดลวดที่มีด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับกริดเอซี จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเอซี เช่น เซอร์วิวดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสจะให้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณ และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.95$ A ที่แสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 12 ชุดทดลองวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด

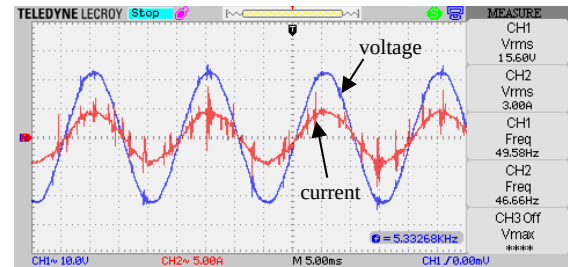


รูปที่ 13 แรงดันดีซีขณะหนึ่ง (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่ง (สีแดง) ของวงจรเรียงกระแส (ผลการทดลอง)



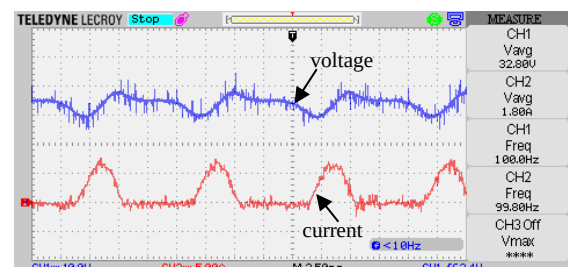
รูปที่ 14 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการคำนวณของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (ผลการทดลอง)

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

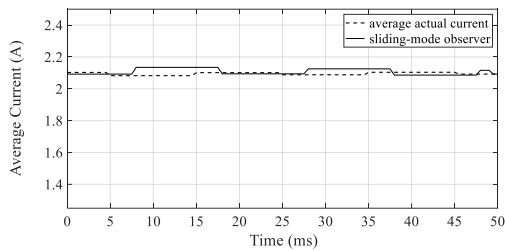


รูปที่ 15 แรงดันกริด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) (ผลการทดลอง)

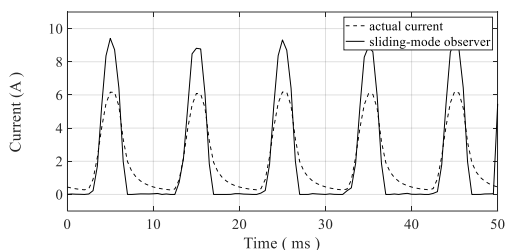
เมื่อพิจารณาการทดลองตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสให้แรงดันดีซีขณะหนึ่งและจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่ 6 A โดยประมาณ ที่แสดงในรูปที่ 16 กระแสไฟฟ้าดีซีมีค่าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.8$ A เช่นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสให้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 17 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่ 9 A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 18 แต่การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 17 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่มากกว่าค่าอยู่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส แต่มีค่าเฉลี่ยเกือบเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดที่แสดงในรูปที่ 17



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



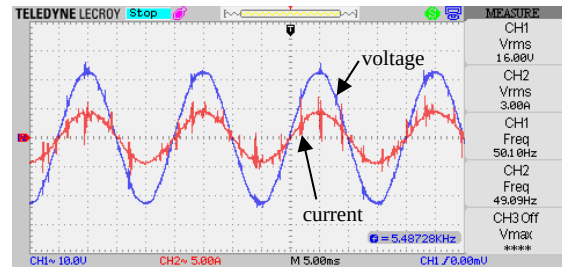
รูปที่ 17 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการทดลอง)



รูปที่ 18 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการทดลอง)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_g) ที่มีค่าอยู่ 4 A โดยประมาณจะมีมุมเฟสที่ตรงกับแรงดันกริดเอซี (v_g) ที่มีค่าอยู่ 22 V โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 19 ดังนั้นกริดได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดมีสัญญาณยดแหลม เมื่อตัวสังเกตโหมดการเลื่อนได้รับกระแสไฟฟ้ากริดเอซี (i_g) ที่ได้จากการวัดสัญญาณยดแหลมที่ปะปนในสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้ากริดจะมีผลกระทบถึงการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแส เนื่องจากตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีพลวัตของการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่รวดเร็ว สัญญาณยดแหลมที่ปะปนในสัญญาณวัดอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

ผลการทดลองได้แสดงถึงตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



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

ที่มีความผิดพลาดมากกว่าแต่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่า เพราะหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยโดยตรง ผลการทดลองได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี 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 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชนิดหนึ่ง i_{pv} ในลักษณะรายคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันจากศูนย์ถึงค่ายอด (peak) และลดลงอย่างต่อเนื่องถึงศูนย์ที่แสดงในรูปที่ 7 ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันดังกล่าวจะเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันดีซีชนิดหนึ่ง v_{pv} มีค่าเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต่อเนื่องในเวลาเดียวกัน นั่นคือ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นค่าบวกอย่างฉับพลัน การเปลี่ยนแปลงของ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ อย่างฉับพลันอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดมากกว่า และตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่าเช่นเดียวกัน

แต่ในการทดลอง วงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชนิดหนึ่ง i_{pv} ในลักษณะรายคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากศูนย์ถึงค่ายอด (peak) ในช่วงระยะเวลาหนึ่งและลดลงอย่างต่อเนื่องถึงศูนย์ที่แสดงในรูปที่ 13 และ 16 การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องนี้จะเป็สาเหตุที่ทำให้แรงดันดีซีชนิดหนึ่ง v_{pv} มีค่าเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่อง นั่นคือ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นศูนย์และเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปเป็นค่าบวกอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงของ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ อย่างต่อเนื่องอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า และตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าเช่นเดียวกัน เพราะหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีโครงสร้างที่พัฒนามาจากแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) ถ้าวจรเรียงกระแส

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

เมื่อวงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชนิดหนึ่ง i_{pv} ที่มีความไม่ต่อเนื่องในการจำลองสถานการณ์ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) จะไม่มีเงื่อนไขลิปชิตซ์ (Lipschitz condition) ในเวลาเดียวกัน [5] ผลเฉลยจึงไม่มีความเป็นไปได้เพียงอย่างเดียว การใช้แบบจำลองพลวัตนี้คำนวณหากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (6) จึงมีความผิดพลาดมากกว่า และเมื่อวงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความไม่ต่อเนื่องหรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาก (อัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาสูงมาก) ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่าเช่นเดียวกัน

7. สรุป

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสโดยตรง ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยให้ความผิดพลาดของการคำนวณค่าเฉลี่ยมากกว่า ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าให้ความผิดพลาดของการประมาณค่าเฉลี่ยน้อยกว่า ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนจึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสมรรถนะของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย แต่ผลการทดลองได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังดีซี ผลการจำลอง

สถานการณ์มีความใกล้เคียงโดยประมาณกับผลการทดลอง งานวิจัยต่อไปจะใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีในระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

8. กิตติกรรมประกาศ

การสร้างอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกิตได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 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 ตั้งกระโทก และคณะ, “การควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกิตเฟสเดียว,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40, ชลบุรี, 15-17 พฤศจิกายน 2560, หน้า 146-149
- [3] ถาวร หินชุย และคณะ, “การควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์ PWM เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกิตเอชซีด้วย TMS320F28335,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38, พระนครศรีอยุธยา, 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า 253-256
- [4] Kim, I. -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.

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