



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

วิธีแบบไม่วนซ้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกริดชนิดหนึ่งเฟส

Non-iterative method for maximum power point tracking of single phase grid-connected PV system

ธนธิป บุญทวี¹ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง² กองพัน อารีรักษ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Tanatip Boontawee¹ Koson Chaicharoenaudomrung² Kongpan Areerak^{1*} Kongpol Areerak¹

¹ School of Electrical Engineering, Instituted of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima 30000

² Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

วันที่รับบทความ 5 มกราคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 1 พฤษภาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ 31 พฤษภาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดชนิดหนึ่งเฟสโดยใช้วิธีแบบไม่วนซ้ำ ซึ่งวิธีดังกล่าว จะพิจารณาบนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คำนวณได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ทำให้ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ใช้วิธีดังกล่าวมีความรวดเร็วกว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แบบวนซ้ำ ประสิทธิภาพของวิธีแบบไม่วนซ้ำที่นำเสนอในบทความนี้ได้รับการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการ ทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 บนโปรแกรม MATLAB/Simulink จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปแสดงถึงประสิทธิภาพในการค้นหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระยะเวลาสั้น ๆ ของวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ

คำสำคัญ

การรบกวนและการสังเกต การเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร วิธีการแบบวนซ้ำ วิธีการแบบไม่วนซ้ำ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดชนิดหนึ่งเฟส

Abstract

This paper presents a maximum power point tracking (MPPT) of single-phase grid-connected photovoltaic (PV) system using non-iterative method. The proposed method considers the change in PV voltage. The reference maximum power of PV panel was calculated by the open-circuit voltage (Voc). Therefore, the power response using the proposed method is faster than that from the iterative MPPT methods. The effectiveness of the proposed non-iterative method was confirmed by computer simulation and hardware in the loop simulation using a TMS320F28335 microcontroller board with MATLAB/Simulink. The results show that the proposed MPPT method can reach the maximum power point in a shorter time compared with the traditional iterative methods.

Keywords

perturb and observe method; fractional open circuit voltage method; iterative MPPT; non-iterative MPPT: grid - connected PV system;

1. บทนำ

แหล่งพลังงานทดแทนมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองต่อความต้องการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ในด้านธุรกิจและอุตสาหกรรม เนื่องจากพลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ในปัจจุบันการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นประโยชน์มากที่สุด เนื่องจากมีมลพิษน้อย อุปสรรคหลักของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สำคัญคือ ต้นทุนเริ่มต้นสูงและไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม ในช่วงวัน นอกจากนี้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำมาก ดังนั้นการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) จึงมีส่วนสำคัญต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อมั่นใจว่าตัวแปลงพลังงานทำงานอยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่าง ๆ ได้รับการพัฒนามากขึ้น [1]-[2] ความแตกต่างของอัลกอริทึมต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนเซนเซอร์ ความซับซ้อน และต้นทุนการดำเนินการของอัลกอริทึม วัตถุประสงค์หลักของอัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหลายเหล่านั้นคือ การบรรลุประสิทธิภาพการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีความรวดเร็ว ความแม่นยำ และลดความผันผวนที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

อัลกอริทึมต่างๆ สามารถแบ่งประเภทของอัลกอริทึมได้เป็น 2 ประเภทหลัก

1) อัลกอริทึมแบบวนซ้ำ (Iterative algorithm) ตัวอย่างเช่น วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturb and observe method: P&O method) [3]-[5] วิธีการเพิ่มความนำ (Incremental conductance method : INC method) [6]-[9]

2) อัลกอริทึมแบบไม่วนซ้ำ (Non-iterative algorithm) ตัวอย่างเช่น วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Fractional open-circuit voltage method: FOCV

method) [10]-[11] วิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Fractional short-circuit current method: FSCC method) [12]-[14]

วิธีการรบกวนและการสังเกต (P&O method) เป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งวิธีการรบกวนและการสังเกตอาศัยหลักการการทำงานด้วยการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าด้วยค่า ΔV (Fixed Step Size) สำหรับติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด กระบวนการเหล่านี้ถูกทำงานซ้ำ ๆ จนกระทั่งถึงจุดการทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะอยู่ตัว ข้อเสียวิธีนี้คือ เกิดการสั่นของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัว การลดการสั่นของกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยการกำหนด ΔV ที่มีขนาดเล็กลงแต่แลกมาด้วยความไวในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (FOCV method) อาศัยหลักการความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ K_V เท่าของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

วิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (FSCC method) อาศัยหลักการความสัมพันธ์เชิงเส้นของกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ K_C เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร

บทความนี้ได้เลือกใช้วิธีการรบกวนและการสังเกต เป็นตัวแทนวิธีแบบวนซ้ำ เพราะวิธีดังกล่าวเป็นวิธีเรียบง่ายสำหรับวิธีแบบวนซ้ำ และมีประสิทธิภาพ ในบทความนี้เลือกใช้วิธีเปรียบเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร เพราะข้อได้เปรียบด้านความปลอดภัยเมื่อเทียบกับวิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร

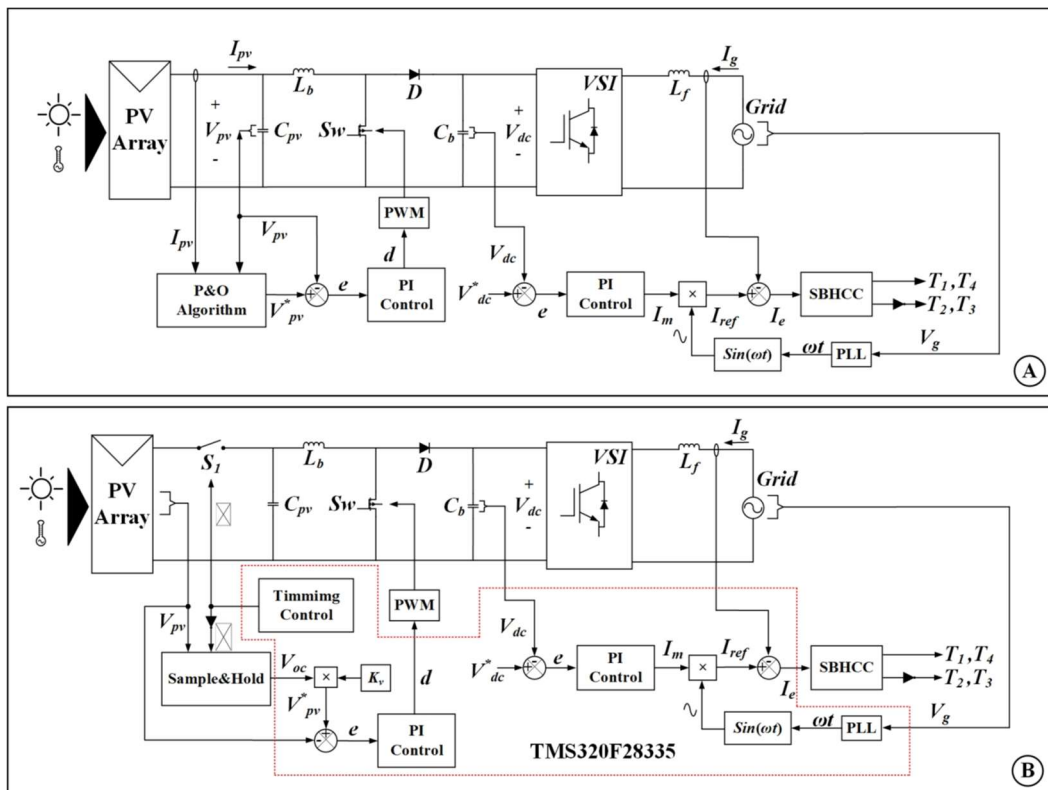
บทความนี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน รายละเอียดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงในหัวข้อที่ 2 ในหัวข้อที่ 3 อธิบายรายละเอียดวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ ในหัวข้อที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ (Simulation

results) และผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop: HIL) ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5 ในส่วนสุดท้ายหัวข้อที่ 6 สรุปข้อดีของวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ

2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาในบทความนี้คือ ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดหนึ่งชนิดเฟส

ประกอบด้วย 2 ระบบ ระบบที่ 1) ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีแบบวนซ้ำแสดงในรูปที่ 1A 2) ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีแบบไมวนซ้ำแสดงในรูปที่ 1B ซึ่งระบบที่พิจารณาทั้งสองวิธีการมีองค์ประกอบร่วมกันคือ วงจรแปลงผันแบบบูสท์ (Boost converter) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) ตัวขดเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับกริดชนิดเฟสเดียว และระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณา

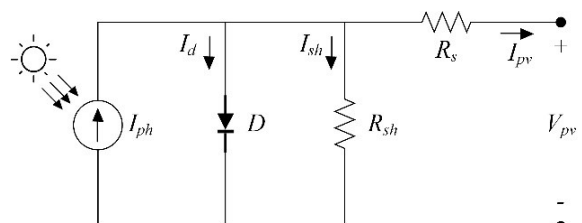


รูปที่ 1 ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด A: วิธีแบบวนซ้ำ, B: วิธีแบบไมวนซ้ำ

3. หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 ระบบที่พิจารณาามีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคือ เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปประกอบไปด้วยไดโอดขนานกับความต้านทานชั้นเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในอุดมคติและความต้านทานอนุกรมแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบาย (I_{pv}) ในสมการที่ 1

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left(e^{\frac{q(V_{pv}/N_s + I_{pv}R_s/N_p)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{N_p V_{pv}/N_s + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

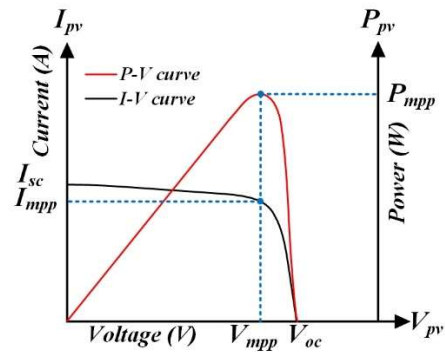
เมื่อ I_{pv} คือกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ I_{ph} คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงหรือกระแสโฟโต N_p คือจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนาน N_s คือจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรม I_{rs} คือกระแสไฟฟ้าความอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด V_{pv} คือแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ k คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน ($1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J / Kevin}$) A คือค่าคงที่อุณหภูมิของไดโอด T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อระบบที่พิจารณามีค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์

พารามิเตอร์	รายละเอียด	หน่วย
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	32.6	A
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	154.5	V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	34.64	A
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	186.5	V
จำนวนแผงที่ต่ออนุกรม (N_s)	5	แผง
จำนวนแผงที่ต่อขนาน (N_p)	4	แผง

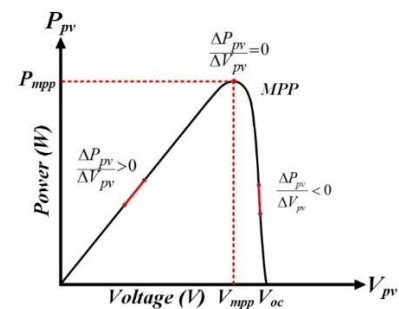
จากสมการกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีพฤติกรรมคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 วิธีการแบบวนซ้ำ

วิธีการรบกวนและการสังเกตเป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีดังกล่าวทำงานเป็นคาบเวลาผ่านการรบกวนด้วยการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{pv}) ด้วยค่า ΔV คงที่ ขั้นตอนการรบกวนแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์อาศัยการตรวจจับการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อคำนวณหาลำโพงไฟฟ้และนำแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับค่าในคาบเวลาปัจจุบันกับค่าในคาบเวลาก่อนหน้าเพื่อวิเคราะห์หาจุดการทำงานของระบบโดยอาศัยกราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4 จากรูปสามารถอธิบายการปรับจุดการทำงานของระบบได้แสดงในสมการที่ 2



รูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

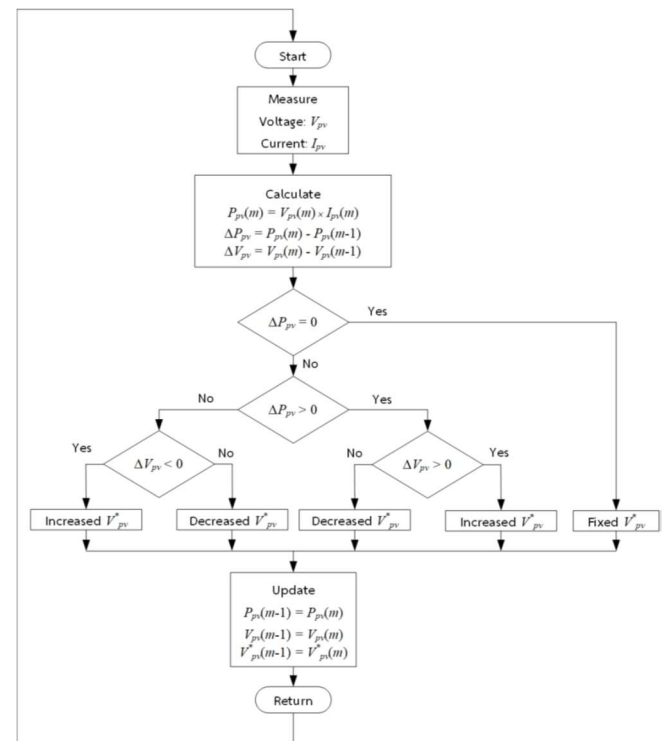
$$\Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} > 0; \text{ at Left side of MPP}$$

$$\Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} < 0; \text{ at Right side of MPP} \quad (2)$$

$$\Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} = 0; \text{ at MPP}$$

หลักการทำงานของอัลกอริทึมการรบกวนและการสังเกต แสดงแผนผังการทำงานของอัลกอริทึมในรูปที่ 5 เริ่มต้นกระบวนการทำงานจากการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และดำเนินการคำนวณหาผลต่างแรงดันไฟฟ้ากับ กำลังไฟฟ้าค่าปัจจุบันกับค่าในอดีต เมื่อดำเนินการเสร็จสิ้นระบบจะเริ่มดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานของวงจร ซึ่งเริ่มจากการตรวจสอบว่าผลต่างกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่ ซึ่งถ้าพบว่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ระบบดำเนินการคงค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในทางตรงกันข้ามผลต่าง กำลังไฟฟ้าไม่เท่ากับศูนย์ระบบดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไข ผลต่างกำลังไฟฟ้ามากกว่าศูนย์หรือไม่ ซึ่งถ้าผลต่างกำลังไฟฟ้า มากกว่าศูนย์ระบบดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไขผลต่าง แรงดันไฟฟ้า เมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าศูนย์ระบบ ดำเนินการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในทางกลับกันผลต่าง แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าศูนย์ระบบดำเนินการลดระดับ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในอีกกรณีหนึ่งผลต่างกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า ศูนย์ระบบดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไขผลต่างแรงดันไฟฟ้า เมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าศูนย์ระบบดำเนินการลดระดับ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในทางตรงกันข้ามผลต่างแรงดันไฟฟ้าน้อย กว่าศูนย์ระบบดำเนินการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อ ระบบดำเนินการทำงานตามเงื่อนไขเสร็จสิ้นระบบจะทำการ อัปเดตค่าแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นค่าในอดีตก่อนเริ่มดำเนินการทำงาน

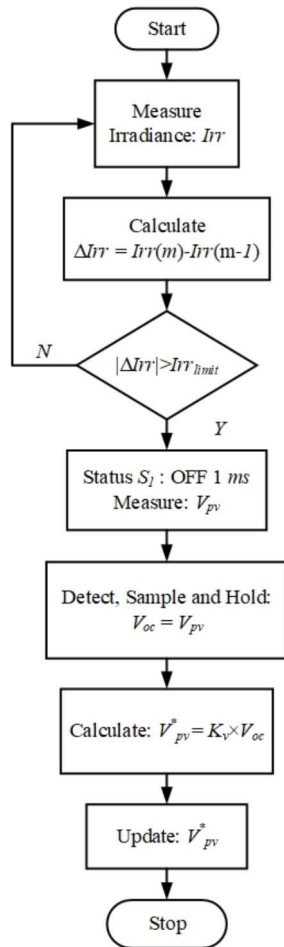
ซ้ำตามขั้นตอน แสดงแผนผังการทำงานของอัลกอริทึมในรูปที่ 5 จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 4 และความสัมพันธ์ของสมการที่ 2 สามารถอธิบายจุดการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้า สูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตด้วยการปรับเพิ่มหรือ ลดระดับแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย ΔV ที่มีค่าคงที่ให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าใกล้เคียงกับ แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 5 แผนภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต

3.3 วิธีการแบบไมวนซ้ำ

วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (FOCV method) เป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าชนิดหนึ่งของวิธีการแบบไมวนซ้ำ หลักการทำงานของอัลกอริทึมเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร เริ่มต้นกระบวนการทำงานจากการวัดค่าความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบผลต่างของความเข้มแสงขณะนั้นกับค่าความเข้มแสงในอดีตเมื่อผลต่างของความเข้มแสงเกินค่าที่กำหนดระบบดำเนินการสั่งการทำงานของสวิตช์ S_1 เปิดวงจรเป็นเวลา 1 มิลลิวินาที เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและคงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสำหรับการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจากการประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า K_v เท่าของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและดำเนินการอัปเดตแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง แสดงแผนผังการทำงานของอัลกอริทึมในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (FOCV method) ถือว่าเป็นวิธีที่ทำงานได้ง่าย ซึ่งวิธีดังกล่าวอาศัยการทำงานบนหลักการแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{oc}) โดยประมาณ K_v เท่าแสดงในสมการที่ 3

$$V_{mpp} \cong K_v V_{oc} \quad (3)$$

ดังนั้น

$$K_v = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \quad (4)$$

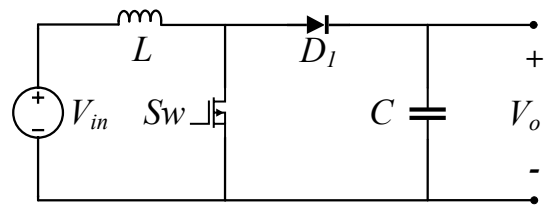
เมื่อ V_{mpp} คือแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด K คือค่าคงที่อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})

ต่อแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{oc}) โดยทั่วไปค่า K มีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 0.85 โดยค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเข้มแสง (Irr) และอุณหภูมิ (T) วิธีนี้ทำงานเป็นคาบเวลาโดยอาศัยวงจรตั้งเวลา (Timer) เพื่อกำหนดช่วงเวลาการตัดวงจรออกชั่วขณะสำหรับตรวจจับการวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร และใช้วงจรสุ่มค่าและคงค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Sample and Hold: S&H) เพื่อคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้า (V_{mpp}) ในช่วงเวลาที่กำหนด

4. การออกแบบพารามิเตอร์ของระบบ

4.1 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบูสต์

วงจรแปลงผันแบบบูสต์แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ให้แรงดันไฟฟ้าอินพุตถูกเพิ่มเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้นตามค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) ตามความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบูสต์สามารถอธิบายได้ในสมการที่ 5



รูปที่ 7 วงจรแปลงผันแบบบูสต์

$$V_o = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (5)$$

เมื่อ V_{in} คือแรงดันไฟฟ้าอินพุต V_o คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต D คือค่าวัฏจักรหน้าที่

บทความนี้มีการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันแบบบูสต์สำหรับติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับกริดชนิดหนึ่งเฟส การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบูสต์ ซึ่งมีความสำคัญต่อผลการตอบสนองของวงจรในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันแบบบูสต์ประกอบไปด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำ (L) ไดโอด (D_1) สวิตช์ Sw และตัวเก็บประจุ (C) การออกแบบขดลวด

เหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแสดงในสมการที่ 6 และสมการที่ 7 ตามลำดับ

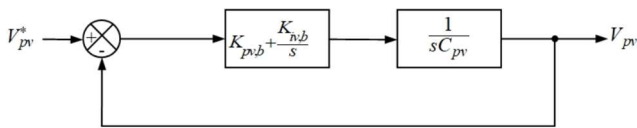
$$L = \frac{V_{in}(V_o - V_{in})}{f_{s,b}\Delta I_L V_o} \quad (6)$$

$$C = \frac{I_o(V_o - V_{in})}{f_{s,b}\Delta V_c V_o} \quad (7)$$

เมื่อ $f_{s,b}$ คือความถี่ของสวิตช์ ΔI_L คือกระแสไฟฟ้ากระแสเพิ่มของขดลวดเหนี่ยวนำ I_o คือกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต V_o คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{in} คือแรงดันไฟฟ้าอินพุตและ ΔV_c คือแรงดันไฟฟ้ากระแสเพิ่มของตัวเก็บประจุ

4.2 การออกแบบตัวควบคุมลูประดันไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบูสต์

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ในบทความนี้อาศัยหลักการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบดั้งเดิมของระบบควบคุม ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่เรียบง่าย การออกแบบตัวควบคุมนี้ถูกประยุกต์ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงแผนภาพของลูประดันไฟฟ้าได้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพลูประดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 8 สามารถเขียนอธิบายในรูปฟังก์ชันการถ่ายโอนของลูประดันไฟฟ้าในสมการที่ 8

$$\frac{V_{pv}}{V_{pv}^*} = \frac{K_{pv,b} + K_{iv,b}}{s^2 + \frac{sK_{pv,b}}{C_{pv}} + \frac{K_{iv,b}}{C_{pv}}} \quad (8)$$

เมื่อ V_{pv}^* คือแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ $K_{pv,b}$ และ $K_{iv,b}$ คือพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ C_{pv} คือตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจร

แปลงผันแบบบูสต์ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีแบบดั้งเดิมจะอาศัยระบบสมการมาตรฐานอันดับ 2 ของระบบควบคุมแบบวงปิด ซึ่งมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ 9

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

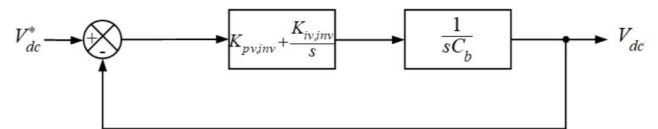
เมื่อ ω_n คือความถี่ของแถบหรือความถี่ธรรมชาติ ζ คืออัตราส่วนการหน่วง เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ตัวหารของสมการที่ 8 กับสมการที่ 9 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของ $K_{pv,b}$ และ $K_{iv,b}$ แสดงในสมการที่ 10 และสมการที่ 11 ตามลำดับ

$$K_{pv,b} = 2\zeta\omega_n C_{pv} \quad (10)$$

$$K_{iv,b} = \omega_n^2 C_{pv} \quad (11)$$

4.3 การออกแบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงอาศัยหลักการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบดั้งเดิม เช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมลูประดันไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ ซึ่งตัวควบคุมนี้ถูกประยุกต์ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่สามารถแสดงแผนภาพของลูประดันไฟฟ้าบัสไฟตรงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพลูประดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

จากรูปที่ 9 สามารถเขียนอธิบายในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนของลูประดันไฟฟ้าบัสไฟตรงในสมการที่ 12

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{K_{pv,inv} + K_{iv,inv}}{s^2 + \frac{sK_{pv,inv}}{C_b} + \frac{K_{iv,inv}}{C_b}} \quad (12)$$

เมื่อ V_{dc} คือแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง C_b คือตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสมประสิทธิ์ตัวหารของสมการที่ 12 กับสมการที่ 9 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอม $K_{pv,inv}$ และ $K_{iv,inv}$ แสดงได้ในสมการที่ 13 และสมการที่ 14 ตามลำดับ

$$K_{pv,inv} = 2\zeta\omega_n C_b \quad (13)$$

$$K_{iv,inv} = \omega_n^2 C_b \quad (14)$$

4.4 การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิส

บทความนี้มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสสำหรับส่งถ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังกริดซึ่งทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าเท่ากับ 1 หลักการของตัวควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสอาศัยการสวิงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) โดยมีขอบเขตการสั่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างคือ แถบฮิสเตอร์ซิส (hysteresis band: HB) เทียบกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในการปรับเพิ่มลดกระแสไฟฟ้าผ่านการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองสามารถแสดงในสมการที่ 15

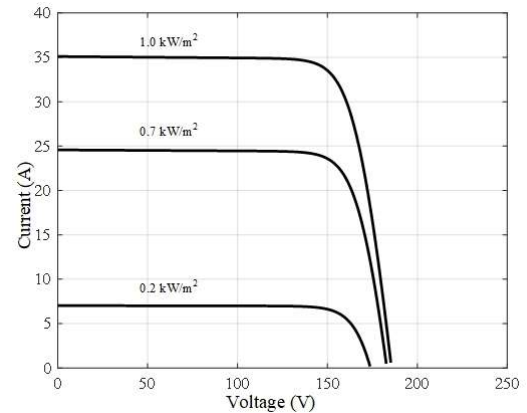
$$L_f = \frac{V_{dc}^2 - V_g^2}{4V_{dc}f_s HB} \quad (15)$$

เมื่อ V_g คือแรงดันไฟฟ้ากริด V_{dc} คือแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง f_s คือความถี่ของสวิตช์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ HB คือแถบฮิสเตอร์ซิส

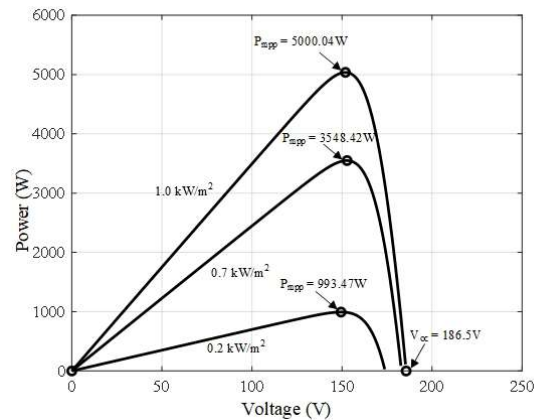
5. ผลการจำลองสถานการณ์และผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

การตรวจสอบประสิทธิภาพของการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งในส่วนผลการจำลองสถานการณ์และในส่วนผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป โดยพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 10

5.1 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์



(A)



(B)

รูปที่ 10 กราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ A: กราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า B: กราฟเส้นโค้งกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า

5.2 พารามิเตอร์ของระบบ

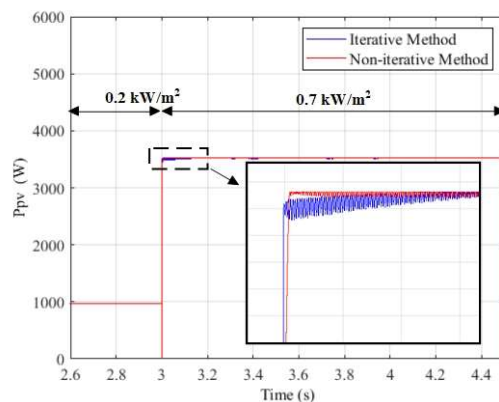
การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของการควบคุม โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าทั้งสองวิธีการมีค่าดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า

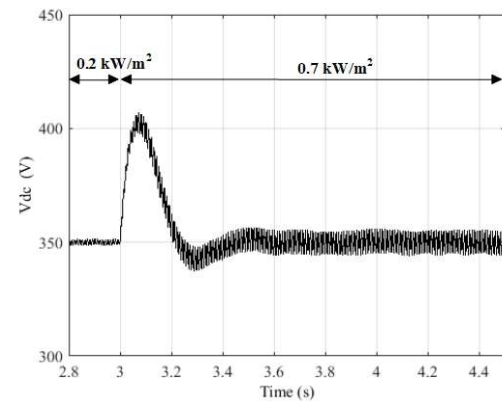
พารามิเตอร์	รายละเอียด	หน่วย
C_{pv}	4000	μF
L_b	2.6	mH
C_b	4000	μF
$f_{s,b}$	10	kHz
$K_{pv,b}$	0.365	-
$K_{iv,b}$	40	-
V_{dc}	350	V
V_g	230	V_{rms}
L_f	18	mH
HB	0.001	A
$K_{pv,inv}$	0.161	-
$K_{iv,inv}$	2.527	-
ΔV	0.2	V
K_V	0.83	-

5.3 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

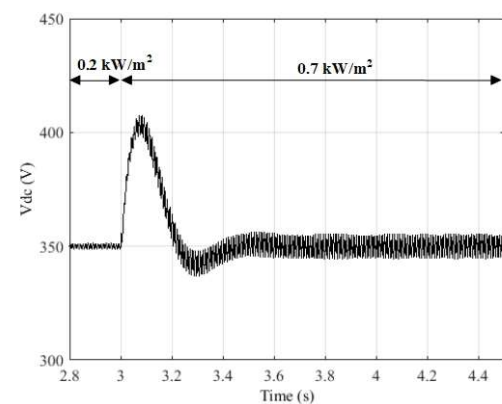
การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อยืนยันผลการเปรียบเทียบวิธีแบบวนซ้ำกับวิธีแบบไม่ววนซ้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดชนิดหนึ่งเฟส



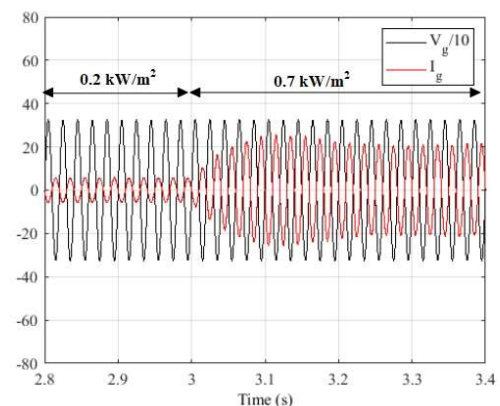
รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าวิธีแบบวนซ้ำกับวิธีแบบไม่ววนซ้ำ



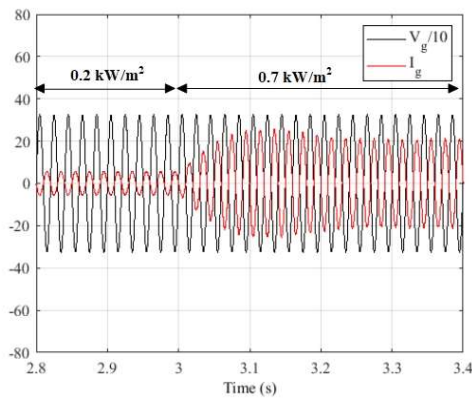
รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของวิธีแบบวนซ้ำ



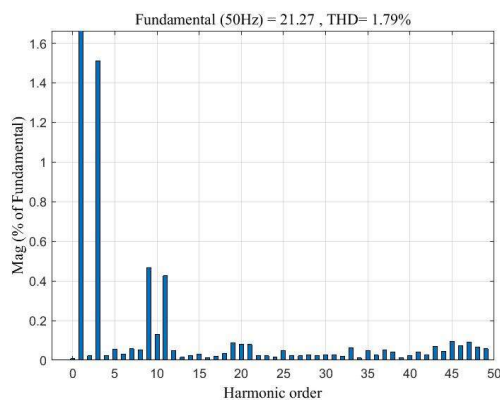
รูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของวิธีแบบไม่ววนซ้ำ



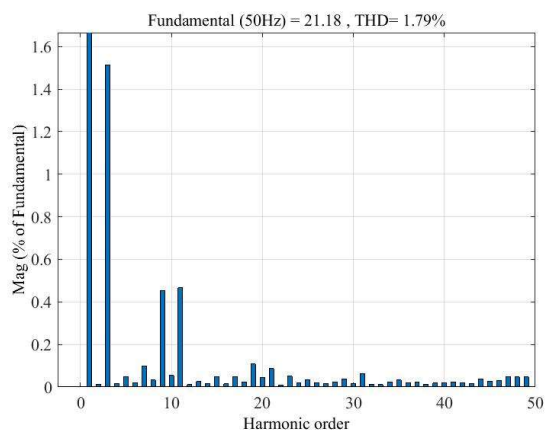
รูปที่ 15 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบวนซ้ำ



รูปที่ 16 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดของแบบไม่วนข้า



รูปที่ 17 กราฟสเปกตรัมฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบวนข้า



รูปที่ 18 กราฟสเปกตรัมฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบไม่วนข้า

จากรูปที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบวิธีแบบวนข้ากับวิธีแบบไม่วนข้าสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด การกำหนดให้ค่า K_V ของระบบวิธีแบบไม่วนข้ามีค่าคงที่ ในบทความนี้พิจารณาจากกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 10(B) ที่ความเข้มแสง 0.7 kW/m^2 พบว่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดดวงจร $V_{oc} = 186.5 \text{ V}$ และแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด $V_{mpp} = 154.5 \text{ V}$ คำนวณค่า K_V ได้เท่ากับ 0.83 จากผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าวิธีแบบไม่วนข้ามีความไวในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธีแบบวนข้า ซึ่งสังเกตจากผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 0.2 kW/m^2 เป็น 0.7 kW/m^2 ณ เวลาที่ 3 วินาที ประสิทธิภาพของวิธีแบบไม่วนข้าขึ้นอยู่กับค่าคงที่ K_V ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3

จากรูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงผลการตอบสนองของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของวิธีแบบวนข้าและวิธีแบบไม่วนข้า เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสไฟตรงเท่ากับ 350 V จากผลการตอบสนองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของทั้งสองวิธีสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงให้คงที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสไฟตรง สังเกตได้จากผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 0.2 kW/m^2 เป็น 0.7 kW/m^2

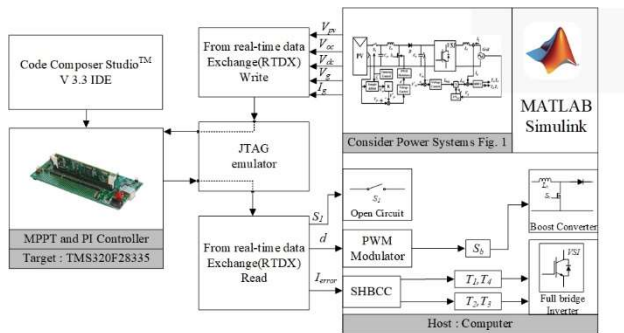
จากรูปที่ 15 และรูปที่ 16 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบวนข้าและวิธีแบบไม่วนข้า จากผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริด พบว่าตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่า 0.95 และมุมเฟสของกระแสไฟฟ้าที่กริดกลับกันกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่กริด 180 องศา แสดงว่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดได้

จากรูปที่ 17 และรูปที่ 18 แสดงกราฟสเปกตรัมฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดแต่ละอันดับของวิธีแบบวนข้าและวิธีแบบไม่วนข้า จากกราฟสเปกตรัมพบว่าค่าฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้ากริด (THD_i) ของวิธีแบบวนข้าคือ 1.79% และค่าฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้ากริด (THD_i) ของวิธีแบบไม่วนข้าคือ 1.79% เมื่อพิจารณาสเปกตรัมแต่ละอันดับกับมาตรฐานการ

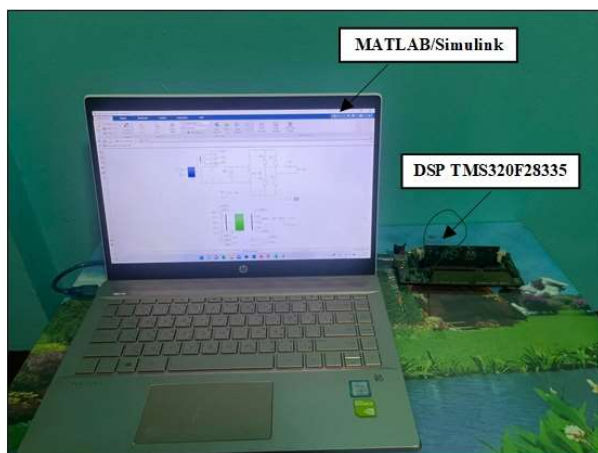
ฉีดกระแสไฟฟ้าเข้ากริดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย พบว่าฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้ากริดแต่ละอันดับและฮาร์โมนิกรวมของกระแสไฟฟ้ากริดมีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐานเลขที่ มอก. 2606-2557 [15] ที่กำหนด

5.4 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

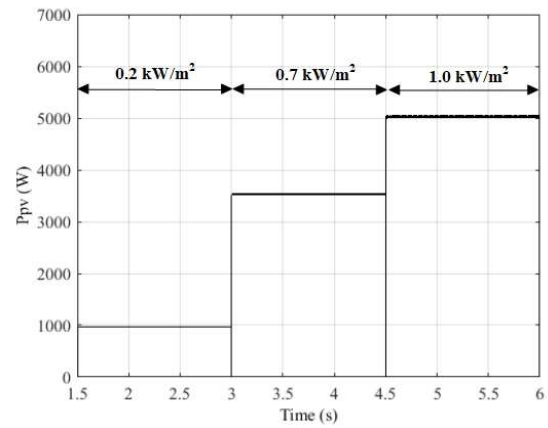
การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปในการตรวจสอบยืนยันประสิทธิภาพการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีแบบไม่วนซ้ำ โดยมีค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบตามตารางที่ 2 การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปอาศัยการทำงาน ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงในรูปที่ 19 และระบบทดสอบแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 19 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 20 ระบบทดสอบฮาร์ดแวร์ในลูป

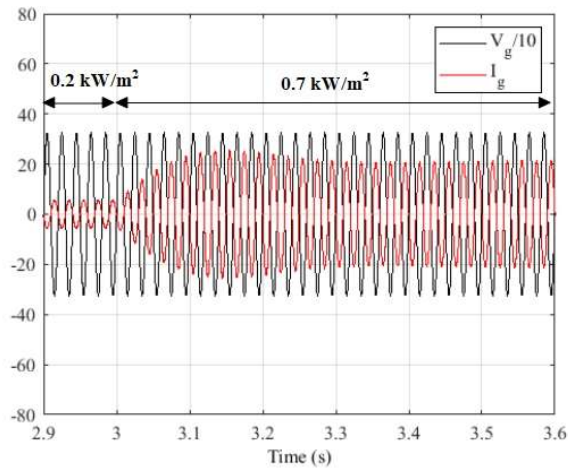


รูปที่ 21 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน

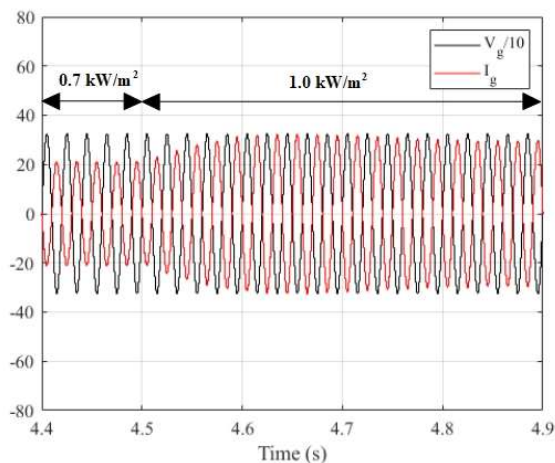
จากรูปที่ 21 แสดงผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ กรณีมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 2 ช่วง ช่วงที่ 1 ณ เวลาที่ 3 วินาที เปลี่ยนจากความเข้มแสง 0.2 kW/m² เป็น 0.7 kW/m² และช่วงที่ 2 ณ เวลาที่ 4.5 วินาที เปลี่ยนจากความเข้มแสง 0.7 kW/m² เป็น 1 kW/m² จากผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าของวิธีแบบไม่วนซ้ำทั้ง 2 ช่วง พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ใกล้เคียงกับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการพหุคูณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

ความเข้มแสง (kW / m^2)	P_{mpp} (W)	P_{pv} (W)
0.2	976.5	971
0.7	3532	3532
1.0	5042	5042



รูปที่ 22 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปลี่ยนความเข้มจาก 0.2 kW/m^2 เป็น 0.7 kW/m^2



รูปที่ 23 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปลี่ยนความเข้มจาก 0.7 kW/m^2 เป็น 1.0 kW/m^2

จากรูปที่ 22 และรูปที่ 23 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดกรณีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 2 ช่วงที่พิจารณา จากผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่กริดแสดงให้เห็นว่ามุมเฟสของกระแสไฟฟ้ามีมุมเฟสกลับกับผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าอยู่ 180 องศา ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดโดยมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.95 และฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กริดมีขนาดอยู่ภายใต้มาตรฐานการฉีกรีดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีแบบไม่ว่าน้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดชนิดหนึ่งเฟส ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1(A) และรูปที่ 1(B) แสดงให้เห็นว่าวิธีแบบไม่ว่าน้ำมีความไวในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รวดเร็วกว่าวิธีแบบวนซ้ำ โดยผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงได้ และส่วนสุดท้ายของการจำลองสถานการณ์ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดยืนยันว่าระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดโดยมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่า 0.95 รวมไปถึงค่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดมีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1(B) วิธีแบบไม่ว่าน้ำสามารถยืนยันได้ว่าถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ภายใต้สภาวะความเข้มแสงที่มีเปลี่ยนแปลง และระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังพลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุม (PEMC) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่และเครื่องมือต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alrubaie AJ, Al-Khaykan A, Malik RQ, Talib SH, Mousa MI, Kadhim AM. Review on MPPT techniques in solar system. *Proceeding of The 8th International Engineering Conference (IEC-2022)*. 2022 23- 24 February; Iraq. Erbil. 2022. p. 123-128.
- [2] Davinder S, Harjinder S. Technical Survey and review on MPPT techniques to attain maximum power of photovoltaic system. *Proceeding of the 5th International Conference on Signal*

- Processing, Computing and Control (ISPPC)*. 2019 10-12 October; India. Solan. 2019. p. 265-268.
- [3] Krishnan AR, Mohammed SS, Manafudeen S. Comparison of P&O MPPT based solar PV system with interleaved boost converter. *Proceeding of the 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*. 2019 5- 6 July; India. Kannur. 2019. p. 1370-1376.
- [4] Lopez- Eauskin R, Gonzalez A, Petrone G, Spagnuolo G, Gyselinck J. Multi-variable perturb and observe algorithm for grid-tied PV systems with joint central and distributed MPPT configuration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2021;12(1): 360-367.
- [5] A. Raiker GA, Umanand L, Reddy BS. Perturb and observe with momentum term applied to current referenced boost converter for PV interface. *Proceeding of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2018 18-21 December; India. Chennai. 2018.
- [6] Triki Y, Bechouche A, Seddiki H, Abdeslam DO. An improved incremental conductance based MPPT algorithm for photovoltaic systems. *Proceeding of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. 2021 13- 16 October; Canada. Toronto, ON. 2021.
- [7] Anowar MH, Roy P. A modified incremental conductance based photovoltaic MPPT charge controller. *Proceeding of the International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*. 2019 7-9 February; Bangladesh. Cox'sBazar. 2019.
- [8] Zakzouk NE, Abdelsalam AK, Helal AA, Williams BW. PV single-phase grid-connected converter: DC-link voltage sensorless prospective. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017; 5(1): 526-546.
- [9] Ali MN, Mahmoud K, Lehtonen M, Darwish MMF. An efficient fuzzy- logic based variable- step incremental conductance MPPT method for grid-connected PV systems. *IEEE Access*. 2021;9: 26420-26430.
- [10] Nadeem A, Sher HA, Murtaza AF, Ahmed N. An online fractional open-circuit voltage maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on sliding mode control. *Proceeding of the International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering & Computer Sciences (RAEE & CS)*. 2020 20- 22 October; Pakistan. Islamabad. 2020.
- [11] Mentaly LE, Amghar A, Sahsah H. Comparison between HC, FOCV and TG MPPT algorithms for PV solar systems using buck converter. *Proceeding of the International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*. 2017 19- 20 April; Morocco. Fez. 2017.
- [12] Nivedha S, Vijayalaxmi. M. Performance analysis of fuzzy based hybrid MPPT algorithm for photovoltaic system. *Proceeding of the International Conference on Communication, Control and Information Sciences (ICCISc)*. 2021 16-18 June; India. Idukki. 2021.
- [13] Hanan M, Ai X, Javed MY, Gulzar MM, Ahmad S. A two- stage algorithm to harvest maximum power from photovoltaic system. *Proceeding of the IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2018 20- 22 October; China. Beijing. 2018.
- [14] Trabelsi H, Elloumi M, Abid H, Kharrat M. MPPT controllers for PV array panel connected to grid. *Proceeding of the 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*. 2017 21- 23 December; Tunisia. Monastir. 2017. p. 505-510.
- [15] กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ – ลักษณะของการเชื่อมต่อระบบ

จำหน่ายไฟฟ้า. มอก. 2606-2557. เข้าถึงได้จาก:
[http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2557/
E/111/2.PDF](http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2557/E/111/2.PDF) [เข้าถึงเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2565].