

การควบคุมกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดัน สำหรับเชื่อมต่อบระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับกริด

Power Control of a Single-Phase Voltage Source Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems

สุพรรณษา เสมอเชื้อ^{*} ยุทธนา ขำสุวรรณ^{**} สุทธิชัย เปรมฤดีปริษาชาญ^{*}
^{*}ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200 โทร 0-5394-4140 โทรสาร 0-5322-1485 E-mail: supansa.cmu@gmail.com, suddichai@ee.eng.cmu.ac.th

^{**}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

อำเภอเมือง ตาก 63000 โทร 0-5551-5962 โทรสาร 0-5551-5900 E-mail: yuttana@ee.eng.cmu.ac.th

Supansa Samerchur^{*} Yuttana Kumsuwan^{**} Suttichai Premrudeepreechacharn^{*}

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

Chiang Mai 50300 Thailand Tel: 0-5394-4140 Fax: 0-5322-1485 E-mail: supansa.cmu@gmail.com, suddichai@ee.eng.cmu.ac.th

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

Tak 60300 Thailand Tel: 0-5551-962 Fax: 0-5551-5900 E-mail: yuttana@ee.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของการเชื่อมต่อบระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับกริดระบบไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดัน โดยใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์สำหรับควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า ซึ่งวิธีการควบคุมที่นำเสนอจะอาศัยพื้นฐานของการควบคุมแบบแยกส่วนระหว่างองค์ประกอบของกระแสจริงกับกระแสเสมือนสำหรับควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนไหลเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทางด้านกริดระบบไฟฟ้า, เพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า กระแสตรงที่ได้รับจากระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับกริดระบบไฟฟ้าและลดความผิดเพี้ยนของคลื่นกระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ โดยได้แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 220V-1kW-50Hz จากการทดสอบพบว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียง 1 และคลื่นกระแสมีความผิดเพี้ยนต่ำซึ่งมีผลรวมของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกต่ำกว่า 5% ในตลอดย่านของการควบคุมกำลังไฟฟ้าตั้งแต่สมภาวะกำลังไฟฟ้าต่ำจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัด

Abstract

This paper presents the design and analysis of both the active and reactive power control of a single-phase voltage

source inverter (VSI) for grid-connected photovoltaic (PV) system.

The proposed method is based on vector control for the power by de-couple control of the active and reactive current components to feed the active and reactive power to the grid. The aim of this research is to the grid input power factor control, the overall efficiency of direct current power of the PV to alternate current power conversion into the grid and a decrease in phase current distortion of VSI. In this work, mathematical modeling of the system and the results of simulations in Matlab/Simulink software are presented to investigate the correctness of the results. Additionally, a normal rated power with 220V-1kW-50Hz. Simulation results that the grid input power factor closely 1, and the phase current of the proposed system to be distortion reduced, causing the total harmonic distortion for various power conditions falls within 5%.

1. บทนำ

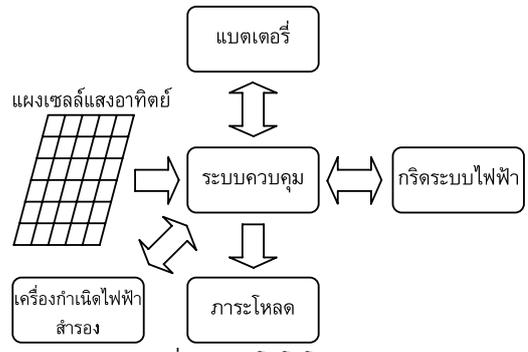
ปัจจุบันการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์อาทิตย์เพื่อเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเรียกว่า "ระบบโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic System: PV)" [1] ซึ่งระบบ PV จะประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ส่วนเก็บพลังงานสะสมด้วย

แบตเตอรี่, ส่วนระบบควบคุมการทำงาน, ส่วนที่เชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า, ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง และส่วนของภาระโหลด ดังแสดงได้จากรูปที่ 1 โดยที่ระบบ PV สามารถแบ่งลักษณะของการเลือกใช้งานได้เป็น 3 ลักษณะ คือ (1) ระบบ PV แบบแยกเดี่ยว (PV Stand-alone system) ซึ่งเป็นระบบการจ่ายไฟฟ้าให้กับภาระโหลดโดยตรง (2) ระบบ PV แบบผสมผสาน (PV hybrid system) เป็นระบบที่นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่างๆ (3) ระบบ PV แบบเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า (PV Grid-connected system) เป็นระบบที่สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความถี่เดียวกันกับกริดระบบไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้กับภาระโหลดและนำกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจ่ายคืนให้กับกริดระบบไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วการใช้ระบบ PV แบบเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้าจะใช้อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งต้องควบคุมปริมาณการป้อนกำลังไฟฟ้า, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทางด้านกริดระบบไฟฟ้าและต้องการคลื่นกระแสไฟสลับที่ไหลเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าใกล้เคียงคลื่นไซน์ ใน [2]-[3] ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis control) โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับกระแสอ้างอิงรูปคลื่นไซน์ในการสร้างสัญญาณขับนำสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ โดยวิธีการดังกล่าวทำให้โครงสร้างของระบบควบคุมมีความง่ายและให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดค่อนข้างดี แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความถี่สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีนี้จะไม่คงที่ ส่งผลทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสสูงและยากต่อการออกแบบวงจรกรอง

ส่วนใน [4] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าจากระบบ PV เข้าสู่กริดระบบไฟฟ้า ด้วยหลักการควบคุมมุมกำลังไฟฟ้า (Power angle control) ที่สามารถควบคุมได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนรวมไปถึงควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดของการปรับค่ามุมกำลังไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการเกิดฮาร์โมนิกของคลื่นกระแสที่ไหลเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าในปริมาณที่สูง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดันสำหรับการเชื่อมต่อนระบบ PV เข้ากับกริดระบบไฟฟ้า ที่มีความแตกต่างกับ [2]-[4] โดยใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าบนพื้นฐานของการควบคุมแบบแยกส่วนขององค์ประกอบกระแสจริงและกระแสเสมือนสำหรับควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ และทำการทดสอบสมรรถนะที่นำเสนอด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ทั้งสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะ

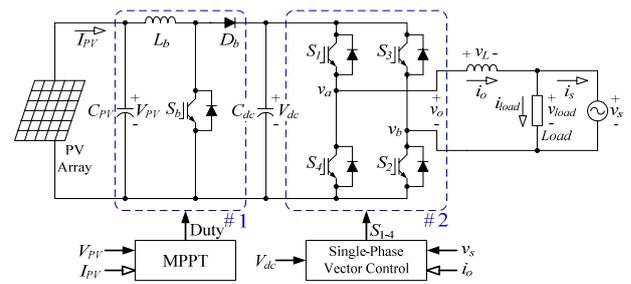


รูปที่ 1 ระบบโฟโตโวลตาอิก

2. การเชื่อมต่อนระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงหลักการทำงานของระบบ PV ที่เชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า, การวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดันสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับออกแบบระบบควบคุมแบบแยกส่วนที่นำเสนอและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกควบคุมจากองค์ประกอบของกระแสจริงและกระแสเสมือนตามลำดับ

2.1 หลักการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า



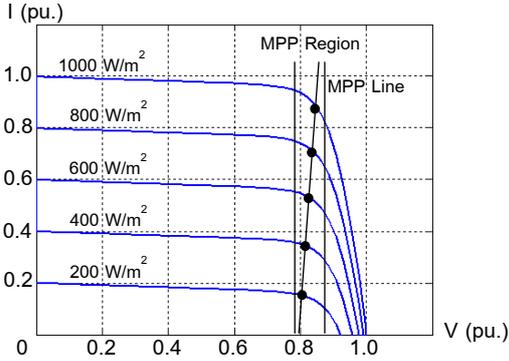
รูปที่ 2 โครงสร้างการเชื่อมต่อนระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับกริดระบบไฟฟ้าที่นำเสนอ

ในรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่อนระบบ PV เข้ากับกริดระบบไฟฟ้า รายละเอียดประกอบด้วยชุดแผงเซลล์อาทิตย์ที่ต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะวงจรถูกนุกรมจำนวน 10 แผง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยเส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทียบกับกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ตามรูปที่ 3 โดยพลังงานแสงอาทิตย์จากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกแปลงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งค่าแรงดันไฟตรง V_{PV} ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาขยายระดับแรงดันให้มีค่าที่สูงขึ้นด้วยวงจรยกระดับแรงดันหรือดีซี-ดีซี บูทส์คอนเวอร์เตอร์ (DC-DC boost converter) โดยที่แรงดันเชื่อมโยงไฟตรง V_{dc} ที่ได้ออกมาจากวงจรยกระดับแรงดันจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลาด้วยวิธีการควบคุมแบบตรวจติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point tracking: MPPT) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของชุดแผงเซลล์อาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่จุดทำงานต่างๆ ตามที่ได้แสดงเส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างแรงดันกับกระแส (หน่วยเป็นแบบต่อหน่วย per unit: pu.) ในช่วงความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงในย่านระหว่าง 200 ถึง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) และจากรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์

V_{oc}

(MPP Line) ด้วยค่า

ปริมาณกระแสไฟตรง 0 ถึง 1.0 I(pu.) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงค่าตามความเข้มแสงที่จุดทำงานต่าง ๆ ของแผงเซลล์อาทิตย์ตามลำดับ ในส่วนสุดท้ายสำหรับการเชื่อมต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบ PV เข้ากับกริดระบบไฟฟ้านั้นจะใช้อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดันที่ทำหน้าที่แปลงปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจากระบบ PV เปลี่ยนให้เป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมการไหลของกระแสและควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับภาระโหลดหรือป้อนเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าได้



รูปที่ 3 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบ

Mitsubishi รุ่น PV-MF 120 EA ที่ 1000 W/m ² , AM 1.5, 25 °C	
พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})	120 W
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	23 V
กระแสไฟฟ้ลัดวงจร (I_{sc})	6.89 A
แรงดันไฟฟ้าเมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp})	19 V
กระแสไฟฟ้าเมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp})	6.30 A

2.2 การวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดันสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า

วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) เป็นเทคนิคการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่แยกอิสระต่อกันในระบบ PV สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดัน โดยวิธีการควบคุมนั้นจะทำการแปลงเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ \vec{v}_{o1} และเวกเตอร์แรงดันด้านกริดระบบไฟฟ้า \vec{v}_s ให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบแรงดันแกนจริงและแกนเสมือนบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$ ซึ่งสามารถแสดงสมการได้เป็น

$$\vec{v}_{o1} = v_{o\alpha1} + jv_{o\beta1} \quad (1)$$

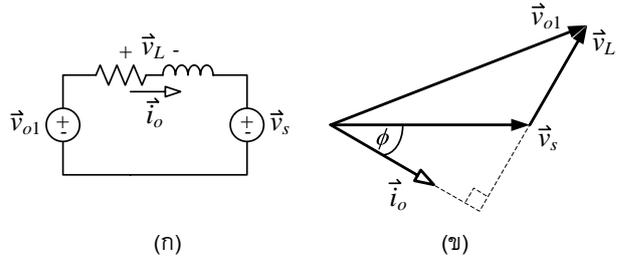
$$\vec{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta} \quad (2)$$

เมื่อ $v_{o\alpha1}, v_{o\beta1}$ คือองค์ประกอบแรงดันหลักมูลของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$, $v_{s\alpha}, v_{s\beta}$ คือองค์ประกอบแรงดันด้านกริดระบบไฟฟ้าบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$

จากรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะทางด้านอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) โดยภายในวงจรจะมีตัวเหนี่ยวนำและความต้านทานแฝงของตัว

เหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมอยู่ระหว่างทางด้านขั้วต่อเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับทางด้านขั้วต่อของกริดระบบไฟฟ้า ซึ่งมุมต่างเฟสระหว่างเวกเตอร์แรงดัน \vec{v}_s กับเวกเตอร์กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ \vec{i}_o จะเป็นมุมของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคลื่อนไขว้ ϕ (Displacement power factor: DPF) ดังแสดงได้จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมของ \vec{v}_s , \vec{v}_{o1} และ \vec{i}_o ตามรูปที่ 4 (ข)

จากวงจรสมมูล, เฟสเซอร์ไดอะแกรม และเวกเตอร์แรงดันใน (1) และ (2) สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ของสมการแรงดันในทอมตัวแปรสองเฟสบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$ โดยใช้ทฤษฎีกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law: KVL) ได้จาก



รูปที่ 4 วงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบที่นำเสนอบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$

$$\begin{bmatrix} v_{o\alpha1} \\ v_{o\beta1} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

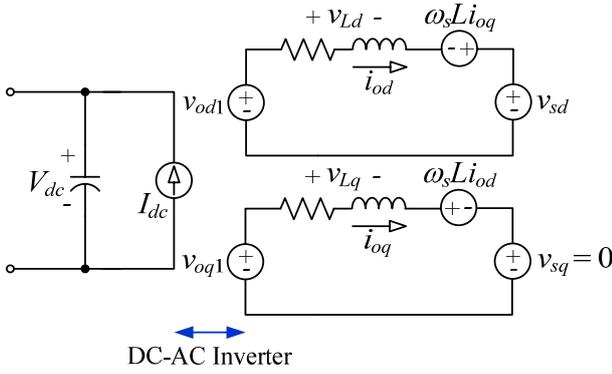
เมื่อ $i_{o\alpha}, i_{o\beta}$ คือองค์ประกอบกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$, และ L, R คือความเหนี่ยวนำและความต้านทานแฝงภายในของตัวเหนี่ยวนำ ตามลำดับ

จาก (3) ทำการแปลงปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับสองเฟสบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$ ให้อยู่ในรูปของปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส $d - q$ จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{od1} \\ v_{oq1} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s L \\ \omega_s L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ v_{od1}, v_{oq1} คือองค์ประกอบแรงดันหลักมูลของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$, v_{sd}, v_{sq} คือองค์ประกอบแรงดันที่กริดระบบไฟฟ้าบนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$, i_{od}, i_{oq} คือองค์ประกอบกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$, ω_s คือความเร็วเชิงมุมของแรงดันกริดระบบไฟฟ้า, $\omega_s = 2\pi f_s$ (rad/s)

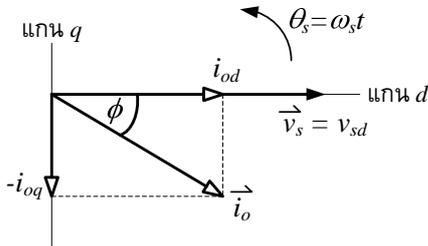
จาก (4) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของแรงดันอินเวอร์เตอร์กับองค์ประกอบของแรงดันที่กริดระบบไฟฟ้าบนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$ และสามารถเขียนวงจรสมมูลของระบบที่นำเสนอขึ้นมาใหม่บนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจากการพิจารณาวงจรสมมูลร่วมกับ (4) จะเห็นได้ว่ามีทอมของแรงดันที่ถูกเชื่อมร่วมกันอยู่สองพจน์ คือ $-\omega_s Li_{oq}$ และ $\omega_s Li_{od}$ รวมอยู่กับสมการแรงดันในแนวแกนอ้างอิง d และแกนอ้างอิง q ตามลำดับ



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของระบบที่นำเสนอบนแกนอ้างอิงหมุน $d-q$

2.3 กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4 (ข) โดยนำมาเขียนใหม่ได้เป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 6 ซึ่งจะพิจารณานบนแกนอ้างอิงหมุน $d-q$ โดยทำการแยกแวกเตอร์กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ \vec{i}_o ให้อยู่ในแนวแกนจริง d และแกนเสมือน q ซึ่งจะได้องค์ประกอบของกระแสจริง i_{od} และองค์ประกอบของกระแสเสมือน i_{oq} ตามลำดับ และจาก (4) จะเห็นว่าขนาดของแรงดันกริดระบบไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับองค์ประกอบแรงดันในแนวแกน d ($|\vec{v}_s| = v_{sd}$) ในส่วนขององค์ประกอบแรงดัน v_{sq} จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบได้ดังนี้



รูปที่ 6 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันและกระแสบนแกนอ้างอิงหมุน $d-q$

กำหนดให้แรงดันที่กริดระบบไฟฟ้าและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คือ

$$\vec{v}_s = \hat{V}_s \cos(\omega_s t) \quad (5)$$

$$\vec{i}_o = \hat{I}_o \cos(\omega_s t - \phi) = \hat{I}_{od} \cos(\omega_s t) - \hat{I}_{oq} \sin(\omega_s t) \quad (6)$$

จาก (6) สามารถแสดงองค์ประกอบกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหมุน $d-q$ ได้จาก

$$i_{od} = \hat{I}_o \cos(-\phi) = \hat{I}_o \cos(\phi) \quad (7)$$

$$i_{oq} = \hat{I}_o \sin(-\phi) = -\hat{I}_o \sin(\phi)$$

เมื่อ \hat{V}_s, \hat{I}_o คือแรงดันสูงสุดของกริดระบบไฟฟ้าและกระแสเอาต์พุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์, $\hat{I}_{od}, \hat{I}_{oq}$ คือองค์ประกอบกระแสเอาต์พุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหมุน $d-q$

พิจารณาสมการแรงดันและกระแสจาก (5)-(7) เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่กริดของระบบไฟฟ้าได้รับจาก

$$p = \hat{V}_s \cos(\omega_s t) \cdot \hat{I}_{od} \cos(\omega_s t) = \frac{\hat{V}_s}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{I}_o}{\sqrt{2}} \cos(\phi) \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} v_{sd} i_{od}$$

$$q = -\hat{V}_s \cos(\omega_s t) \cdot \hat{I}_{oq} \sin(\omega_s t) = -\frac{\hat{V}_s}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{I}_o}{\sqrt{2}} \sin(\phi) \quad (9)$$

$$= -\frac{1}{2} v_{sd} i_{oq}$$

จาก (8) และ (9) เมื่อแรงดันที่กริดระบบไฟฟ้าคงที่ จะทำให้องค์ประกอบของแรงดันกริดระบบไฟฟ้า v_{sd} คงที่ด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริง p และกำลังไฟฟ้าเสมือน q ที่จ่ายเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ i_{od} และ i_{oq} ตามลำดับ

3. ระบบการควบคุมแบบแวกเตอร์

เมื่อพิจารณาจาก (4) ในหัวข้อย่อยที่ 2.2 เพื่อทำการควบคุมระบบให้เป็นแบบแยกแวกจึงทำการชดเชยแรงดันในส่วนของเทอมเชื่อมร่วมขององค์ประกอบแรงดัน v_{od1} และ v_{oq1} ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$v_{od1} = v_{Ld} + (\omega_s L i_{oq} + v_{sd}) \quad (10)$$

$$v_{oq1} = v_{Lq} - (\omega_s L i_{od})$$

กำหนดให้

$$v_{Ld} = R i_{od} + L \frac{di_{od}}{dt} \quad (11)$$

$$v_{Lq} = R i_{oq} + L \frac{di_{oq}}{dt}$$

หรือเขียนในเทอม s โดเมนของ (11) ได้เป็น

$$G(s) = \frac{i_{od}(s)}{v_{Ld}(s)} = \frac{i_{oq}(s)}{v_{Lq}(s)} = \frac{1}{R + Ls} \quad (12)$$

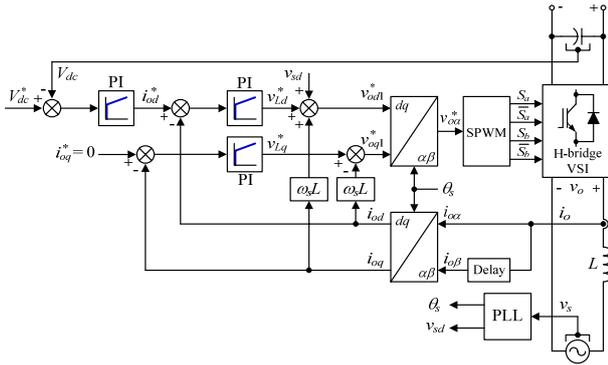
และจาก (12) จะใช้ตัวควบคุมวงรอบกระแสแบบพีไอสำหรับการหาปริมาณแรงดัน v_{Ld} และ v_{Lq} ในส่วนของปริมาณแรงดันคำสั่ง v_{od1}^* และ v_{oq1}^* สามารถกำหนดได้จากสมการคือ

$$v_{od1}^* = v_{Ld} + (\omega_s L i_{oq} + v_{sd}) \quad (13)$$

$$v_{oq1}^* = v_{Lq} - (\omega_s L i_{od})$$

โดย (13) ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ที่อยู่ในรูปของปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะใช้ค่านุมของกริดระบบไฟฟ้าที่ได้มาจากการทำเฟสล็อกคูลูป (Phase locked loop: PLL) สำหรับแปลงให้เป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับในเทอมตัวแปรสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุนหนึ่ง $\alpha - \beta$ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จาก (14) แล้วจึงนำเฉพาะค่าองค์ประกอบแรงดันคำสั่งอ้างอิง v_{od1}^* ไปמודูเลตแบบพีดับเบิลเอ็มด้วยเทคนิคยูนิโพลาร์สำหรับสร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์อินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยไดอะแกรมของระบบควบคุมทั้งหมดที่ได้นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 7

$$\begin{bmatrix} v_{oa}^* \\ v_{ob}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) \\ -\sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{od}^* \\ v_{oq}^* \end{bmatrix} \quad (14)$$



รูปที่ 7 ไลอะแกมระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ที่นำเสนอ

4. ผลการทดสอบ

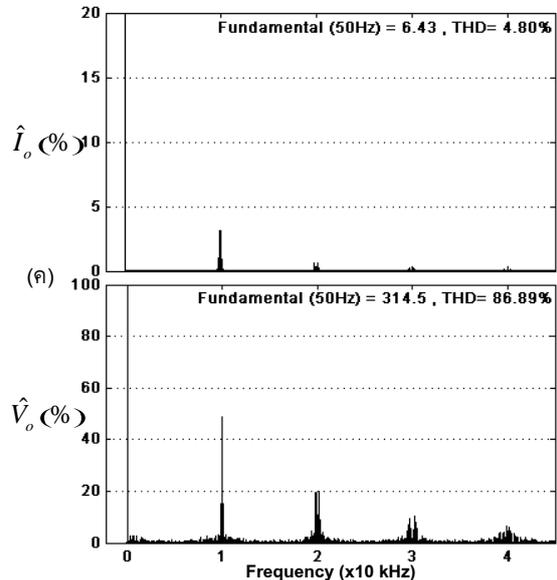
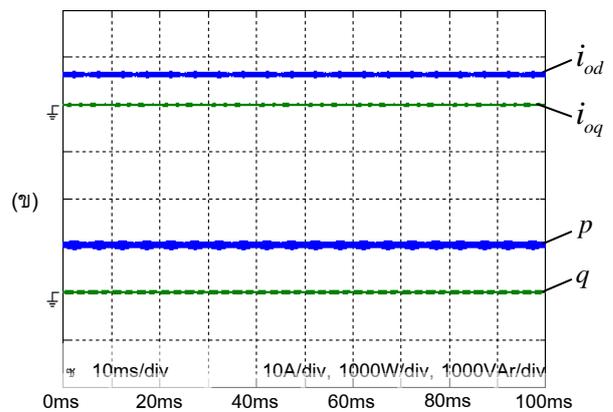
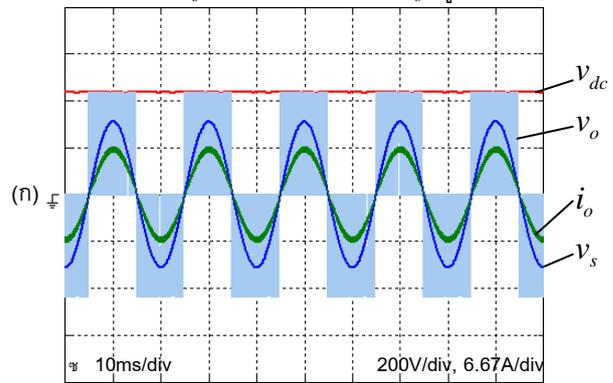
รายละเอียดของการแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมที่นำเสนอสำหรับเชื่อมต่อบน PV เข้ากับกริดระบบไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดัน ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานและแสดงผลการทดสอบมีรายละเอียดตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยที่แรงดันเชื่อมโยงไฟตรง V_{dc} จะถูกรักษาไว้ให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา ด้วยวงจรถวลระดับแรงดันที่ถูกควบคุมการทำงานด้วยวิธีการตรวจติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในเงื่อนไขที่ความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงค่าในย่านตั้งแต่ 200 ถึง 1000 W/m^2 และในการจำลองการทำงานของระบบได้ใช้วิธีการสวิตซ์ซึ่งที่ดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์ด้วยค่าความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 5 kHz ในด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะใช้ตัวเหนี่ยวนำซึ่งทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากการสวิตซ์โดยต่ออยู่ระหว่างขั้วต่อด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับกริดระบบไฟฟ้า จากการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอได้แสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

แรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้า (v_s)	220	V_{rms}
ความถี่หลักมูลของกริดระบบไฟฟ้า (f_s)	50	Hz
ความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ (f_{sw})	5	kHz
ขนาดตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง (C_{dc})	2,400	μF
ขนาดตัวเหนี่ยวนำ (L)	12	mH
ค่าความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำ (R)	0.05	Ω
แรงดันเชื่อมโยงไฟตรง (V_{dc})	440	V

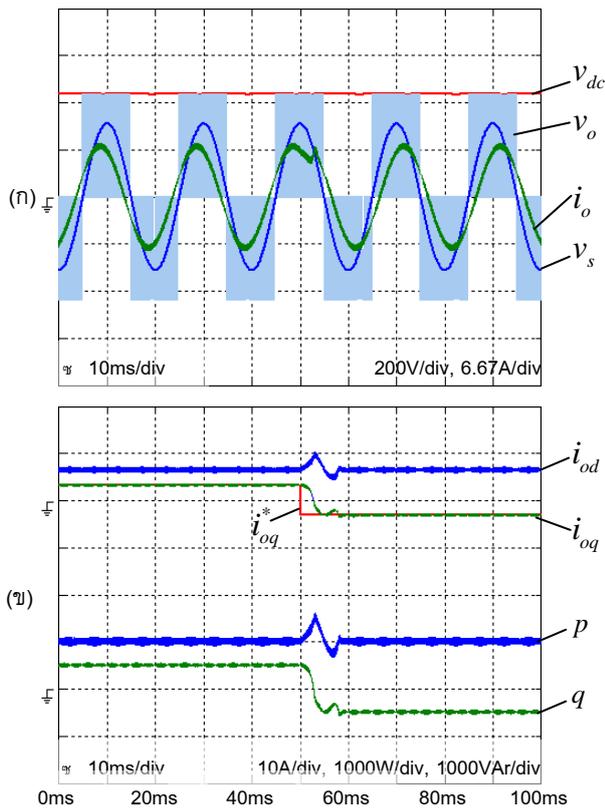
รูปที่ 8 (ก) แสดงคลื่นแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง v_{dc} , คลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ v_o , คลื่นแรงดันด้านอินพุตจากกริดระบบไฟฟ้า v_s , คลื่นกระแสที่ไหลออกจากอินเวอร์เตอร์เข้าสู่กริดระบบไฟฟ้า i_o รูปที่ 8 (ข) แสดงคลื่นกระแสจริง i_{od} กับคลื่นกระแสเสมือน i_{oq} โดยวัดเทียบกับคลื่นกำลังไฟฟ้าจริง p , กำลังไฟฟ้าเสมือน q และรูปที่ 8 (ค) แสดงแถบสเปกตรัมของคลื่นกระแส i_o และคลื่นแรงดัน v_o ตามลำดับ

ซึ่งจากรูปที่ 8 เป็นการแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุมที่นำเสนอในสภาวะคงตัว โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริง p มีค่าคงที่เท่ากับ 1000 W ในขณะที่กำลังไฟฟ้าเสมือน q มีค่าเท่ากับ 0 VAR ซึ่งสอดคล้องกับคลื่นกระแสกำลัง i_{od} และ i_{oq} โดยมีค่าเท่ากับ 6.43 A และ 0 A ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการควบคุมองค์ประกอบของกระแสจริง i_{od} และกระแสเสมือน i_{oq} ในลักษณะแบบแยกส่วนที่นำเสนอสามารถควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าของระบบ PV เข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ค่า %THDi ของคลื่นกระแส i_o ที่ไหลเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 4.8% ซึ่งมีความใกล้เคียงคลื่นไซน์โดยมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของคลื่นไซน์ DPF คือ $\cos(\phi) = 1$ และให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของกริดระบบไฟฟ้า PF มีค่าเป็น $DPF / \sqrt{1 + THD_i^2} = 0.998$ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 8 (ก) จะเห็นว่าคลื่นแรงดัน v_s อินเฟสกับคลื่นกระแส i_o อยู่ตลอดเวลา

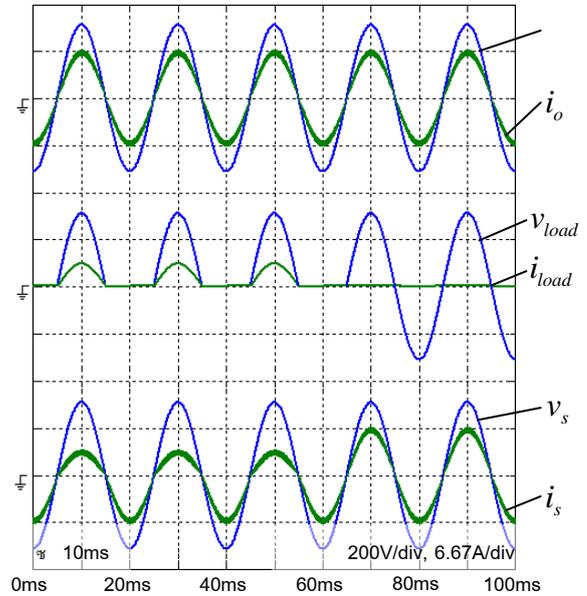


รูปที่ 8 คลื่นแรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน และแถบสเปกตรัมของระบบที่นำเสนอ

รูปที่ 9 แสดงสมรรถนะของผลการสนองในสภาวะชั่วขณะของระบบควบคุมที่นำเสนอ โดยทำการเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่ง i_{oq}^* แบบทันทีทันใดในลักษณะแบบขั้น โดยกำหนดค่ากระแสอ้างอิง i_{oq}^* ให้เปลี่ยนแปลงจาก +3.2 A ไปเป็น -3.2 A ณ จุดเวลา 50 ms จากรูปที่ 9 (ก) แสดงคลื่นแรงดัน v_{dc} , v_o และ v_s วัดเทียบกับคลื่นกระแส i_o โดยจะเห็นว่าความมุมระหว่างเฟส ϕ ของคลื่นกระแส i_o เทียบกับคลื่นแรงดัน v_s จะเปลี่ยนจากมุมหน้าหน้า 26.6° ไปเป็นมุมล้าหลัง 26.6° ภายในระยะเวลาหนึ่งไซเคิล โดยที่ กำลังไฟฟ้าเสมือน q จะเปลี่ยนจาก +500 VAR ไปเป็น -500 VAR ในขณะที่กำลังไฟฟ้าจริง p ยังคงถูกรักษาไว้ให้มีค่าเท่ากับ 1000 W อยู่ตลอดเวลาด้วยคำสั่งของวงจรถ่ายกระแสจริง i_{od} ส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของคลื่นไซน์, DPF มีค่าเป็น $\cos(26.6^\circ) = 0.89$ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของกริดระบบไฟฟ้า PF จะมีค่าเท่ากับ 0.888 ตามลำดับ ดังแสดงได้จากรูปที่ 9 (ข) จากลักษณะของคลื่นกระแสและคลื่นแรงดันดังกล่าวได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงสมรรถนะของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอสามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือน q จากกริดระบบไฟฟ้า



รูปที่ 9 คลื่นแรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ของระบบที่นำเสนอ



รูปที่ 10 คลื่นแรงดัน, กระแส, ของระบบที่นำเสนอ

สุดท้ายในรูปที่ 10 แสดงคลื่นแรงดัน v_s , คลื่นกระแส i_o , คลื่นแรงดัน, กระแส v_{load} , i_{load} ของภาระโหลดวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว และคลื่นแรงดัน v_s , คลื่นกระแส i_s ที่ไหลเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าตามลำดับ เพื่อทดสอบสมรรถนะในการจ่ายให้กับภาระโหลดแบบไม่เชิงเส้นที่มีขนาดเท่ากับ 250 W จากรูปที่ 10 (บน) จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแส i_o อินเฟสกับคลื่นแรงดัน v_s โดยที่ระบบ PV จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง p ผ่านอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ 1,000 W ไหลเข้าไปช่วยจ่ายให้กับภาระโหลดและเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้า ในรูปที่ 10 (กลาง) แสดงคลื่นแรงดัน v_{load} วัดเทียบกับคลื่นกระแส i_{load} ของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวด้วยภาระโหลด ตัวต้านทานขนาด 87Ω ซึ่งต่อขนานอยู่ทางด้านกริดระบบไฟฟ้า ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยค่า %THD, ของคลื่นกระแส i_{load} จะมีค่าเท่ากับ 43.61% ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ได้รับออกมาจากระบบ PV จะทำหน้าที่ช่วยจ่ายให้กับภาระโหลดนี้ แต่อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เหลือก็ยังคงบ่อนคืนให้กับกริดระบบไฟฟ้า จากเงื่อนไขการทดสอบการจ่ายภาระโหลดแบบไม่เชิงเส้นดังกล่าว ค่า %THD, ของคลื่นกระแส i_o ทางด้านกริดระบบไฟฟ้าจะลดลงเป็น 15.78% และเพื่อยืนยันถึงสมรรถนะของระบบควบคุมที่นำเสนอในรูปที่ 10 (ล่าง) ได้แสดงคลื่นแรงดัน v_s และคลื่นกระแส i_s ที่ไหลเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้า เมื่อทำการปลดภาระโหลดวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวออกแบบทันทีทันใด ณ จุดเวลา 65 ms ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นแรงดัน v_s จะอินเฟสกับคลื่นกระแส i_s โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริง p จากระบบ PV ทั้งหมดจะไหลบ่อนเข้าสู่กริดระบบไฟฟ้าโดยตรง

5. สรุป

วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดจ่ายแรงดันสำหรับการเชื่อมต่อระบบ PV เข้ากับกริดระบบไฟฟ้าโดยใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่แยกอิสระต่อกันบนพื้นฐานของการควบคุมแบบแยกแรมขององค์ประกอบกระแสจริงและกระแสเสมือนสำหรับควบคุมการบ่อนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบ จากผลการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

1. Tomas Markuart, "Solar Electricity," John-Wiley & Sons, New York, 2000.
2. S. Kjaer, J. Pedersen, F. Blaabjerg, "A Review of Single Phase Grid Connected Inverters for Photovoltaic Modules," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sept/Oct. 2005.
3. N. A. Rahim, J. Selvaraj, Krismadinata. "Hysteresis Current Control and Sensorless MPPT for Grid-Connected Photovoltaic Systems," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 572-577, 2007.
4. L. Hassaine, E. Olias, J Quintero, M. Haddadi, "Digital Power Factor Control and Reactive Power Regulation for Grid-Connected Photovoltaic Inverter," Renewable Energy, vol. 34 pp. 315-321, 2009.