



การพัฒนาอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กแบบเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เข้าสู่ระบบไฟฟ้าสำหรับติดตั้งบนหลังคา

Developing Grid-connected Photovoltaic Power Generation Microinverter for Solar rooftop Systems

ทรงกลด ศรีปรางค์^{1*}, วันชัย ทรัพย์สิงห์², ชาญวิทย์ บุญช่วย¹

¹ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ถ.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก (คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

*E-mail: songklod.sri@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก (Micro-inverter) สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเข้าระบบ โดยระบบการแปลงผันพลังงานที่นำเสนอเป็นฟลายแบคแบบขนาน (Interleaved Flyback Converter: IFBC) มีวงจรถัก Spike ของเอาต์พุต ดำเนินการโดยการสร้างแบบจำลอง, การออกแบบระบบควบคุม และสร้างต้นแบบเพื่อใช้งานทดสอบการทำงาน ผลการทดสอบของแบบจำลองแสดงให้เห็นการทำงานของระบบที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ โดยใช้เวลาเพียง 0.005 วินาที และการทำงานของชุดต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ คือให้อาต์พุตที่เป็นไปตามแบบจำลอง

คำสำคัญ: ไมโครอินเวอร์เตอร์, กริดคอนเน็คไมโครอินเวอร์เตอร์, ระบบโซลาร์เซลล์บนหลังคา

Abstract

This paper proposes a single phase grid-connected microinverter for photovoltaic power generation systems. The proposed microinverter topology is based on a flyback converter and an active clamp circuit for reducing effects of output signal spikes. The paper includes modeling and designing the controller for the inverter. And an interleaved flyback module-integrated converter (IFMIC) prototype is developed. The experimental results of the microinverter model show responses during load changing. The controller can track the reference signal within 0.005 seconds. In addition, the experimental results confirm performance of the proposed microinverter compared to the simulation results.

Keywords: Micro-inverter, Grid-connected Micro-inverter, Solar Rooftop Systems

1. คำนำ

ความสนใจในการผลิตพลังงานจากพลังงานทดแทนมีมากขึ้นในหลายปีที่ผ่านมาเนื่องจากวิกฤตด้านพลังงาน [1] แหล่งพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้มากที่สุดถึง 30% และในอนาคตข้างหน้าจะมีการใช้งานมากขึ้นอีก ระบบอินเวอร์เตอร์แบบ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 อินเวอร์เตอร์ หรือ ไมโครอินเวอร์เตอร์ (Micro-inverter) กลายเป็นที่นิยมใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีข้อได้เปรียบ

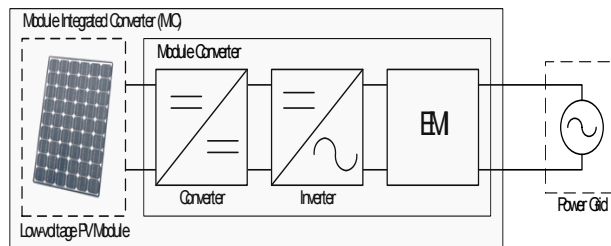
กว่าระบบอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น และสามารถแก้ปัญหา อาทิเช่น การติดตามพลังงานสูงสุดต่อแผง (MPPT) ลดพลังงานสูญเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เท่ากันและปัญหาการบดบังแสงอาทิตย์ [1] และการใช้งานจะต่อขนานกันดังรูปที่ 1 จากโครงสร้างดังกล่าวหากมีปัญหาจากอินเวอร์เตอร์ชุดใดในระบบ อินเวอร์เตอร์ดังกล่าวจะปลดตัวเองออกจากระบบ แก้ปัญหาระบบเสถียรภาพนำไปสู่เหตุการณ์โดมิโน (Domino) ซึ่งปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการแปลงผันพลังงาน, ต้นทุนของระบบ, ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น และเสถียรภาพ ฯลฯ [2]

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์ที่เป็นแบบ Flyback Module Integrated Converters (FMICs) โดยการทำให้แบบจำลอง, การออกแบบระบบควบคุม, การทำ Simulation และสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบการทำงาน

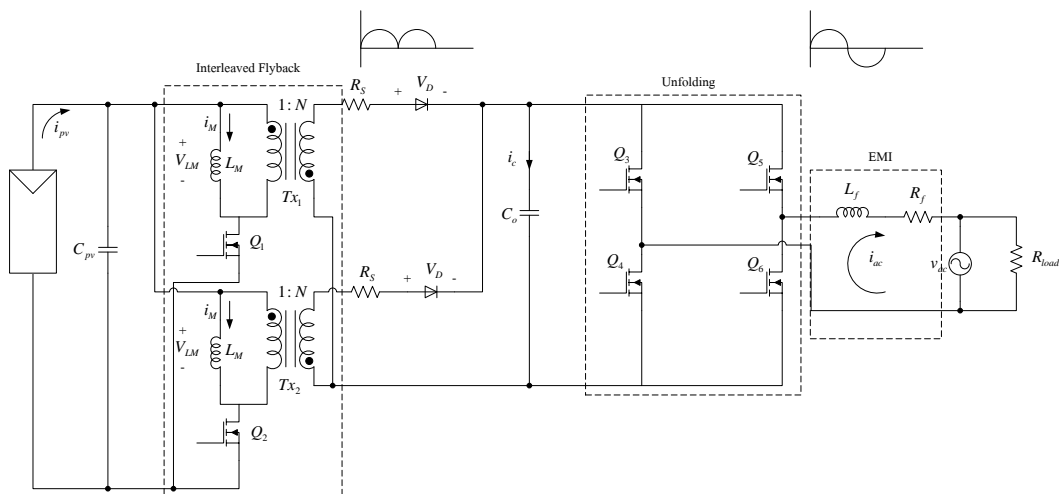
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไมโครอินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของระบบแปลงผันพลังงานแบบ MIC จะเป็นแบบรวมอยู่กับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากแรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแรงดันต่ำ ในขณะที่เปิดวงจร (Open-circuit Voltage) แรงดันที่ได้อยู่ในช่วง 27-45 โวลต์ แต่แรงดันในระบบสายส่ง (Grid) มีขนาดแรงดัน 220 โวลต์ (สำหรับประเทศไทย) ดังนั้นการใช้งานโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีการเพิ่มขนาดของแรงดันขึ้นโดยใช้ระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Converter) แล้วจึงเข้าสู่การแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรือเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ จากที่กล่าวมาสามารถสรุปโครงสร้างของระบบ MIC ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1: บล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบของ Micro-inverter

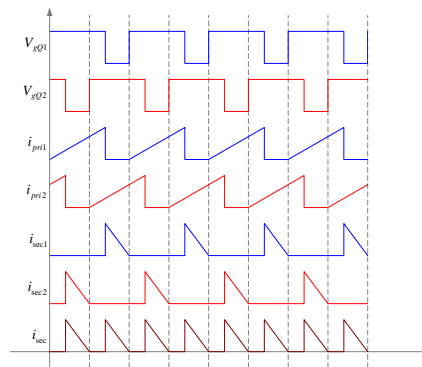


รูปที่ 2: วงจรการทำงานของ Interleaved Flyback Converter

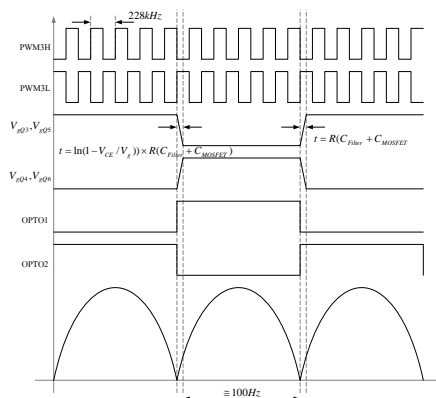
2.2 Interleaved Flyback Converter

วงจรของ Interleaved Flyback Converter แสดงดังรูปที่ 2 การทำงานของวงจรเริ่มจาก วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ดึงกระแสจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มอดดูเลตสัญญาณให้เป็นรูปคลื่น Full-wave-Rectifier โดยการสวิตช์ Q1 และ Q2 ซึ่งจะสวิตช์ด้วยความถี่สูง โดยที่สัญญาณจุดชนวนขาเกตของ Q1 และ Q2 มีระยะห่างกัน 180 องศา จากนั้นวงจร H-Bridge ที่ใช้มอสเฟต Q3-Q6 เป็นสวิตช์ทำหน้าที่ (Unfolding) สัญญาณให้เป็นรูปคลื่นไซน์ โดย Q3 และ Q4 ทำให้เป็นซีกครึ่งคลื่นบวก และ Q1 กับ Q6 ทำให้เป็นครึ่งคลื่นลบ และ EMI ทำหน้าที่กำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของอินเวอร์เตอร์ที่ฉีดเข้าระบบไฟฟ้า

จังหวะการทำงานของสวิตช์ Q1 กับ Q2 และกระแสที่เกิดขึ้นขณะทำการสวิตช์ในแบบ Discontinuous mode (DCM) แสดงดังรูปที่ 3 และการทำงานของสวิตช์ Q3 – Q6 พร้อมกับรูปคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4 มีการใช้งาน Opto-coupler ร่วมกับวงจรขับเคลื่อนแบบหม้อแปลงความถี่สูง



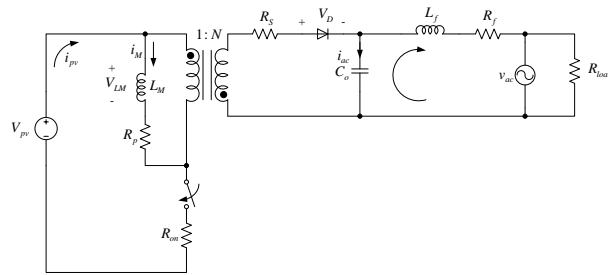
รูปที่ 2: การทำงานของสวิตช์ Q1 และ Q2 ในแบบ DCM



รูปที่ 4: รูปคลื่นสัญญาณสั่งงานวงจร Unfolding

3. แบบจำลองและการออกแบบระบบควบคุม

วงจรสมมูลของฟลายคอนเวอร์เตอร์ 1 วงจรแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะคล้ายกับวงจร Buck-Boost คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4: วงจรการทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

การทำงานแบบของจำลองนั้นจะกำหนดให้แรงดันด้านออก (Grid Voltage) เป็นแรงดันกระแสตรงคงที่แบบครึ่งคลื่นเป็นค่า RMS ของแรงดันไฟฟ้า และการสวิตช์จะมีความถี่สูงกว่าความถี่ของระบบไฟฟ้า (Grid) ภายในฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ทำงาน 3 สถานะ และนั่นหมายถึงจะมีการเก็บพลังงานอยู่ใน 3 ส่วนประกอบ ซึ่งทั้งหมดใช้ในการพิจารณาทำแบบจำลอง 1) $I_M(s)$ – Flyback inductor current 2) $V_{ac}(s)$ – Flyback output capacitor voltage และ 3) $I_{ac}(s)$ – Output filter inductor current which is fed to the grid จากวงจรในรูปที่ 5 ใช้ KVL และ KCL ในการสร้างสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{LM} &= L_M \frac{di_M}{dt} = d \times v_{pv} - d \times i_M (R_{on} + R_p) - d' \left(\frac{v_{ac} + i_M R_s}{N} \right) \\
 i_s &= \frac{i_M}{N} d' \\
 V_{Lf} &= V_{ac} - i_{ac} R_f - v_{grid} \\
 i_c &= C \frac{d(v_{ac})}{dt} = i_s - i_{ac} \\
 v_{grid} &= R_{load} \times i_{ac} i_{pv} = d \times i_M \\
 i_{pv} &= d \times i_M
 \end{aligned} \tag{1}$$

โดยที่ $d' = 1 - d$

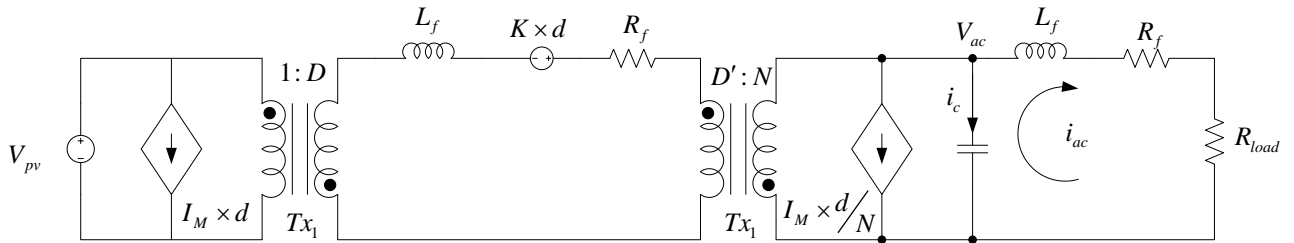
และเพื่อที่จะออกแบบระบบควบคุมจะต้องหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุต และการวิเคราะห์พลวัตของระบบจะต้องทำให้ระบบอยู่ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น (Linear) จากสมการที่ 1 นั้นเป็นสมการของสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ทำให้อยู่ในแบบเชิงเส้นโดยการพิจารณาด้วยสัญญาณเล็ก และเขียนสมการให้อยู่ในสมการสเตต (State space equation) โดยรูปแบบของสมการสเตตเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 x'(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\
 y(t) &= Cx(t) + Du(t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

โดยแบ่งออกเป็นตัวแปรสเตตคือ x ตัวแปรอินพุตคือ u และตัวแปรเอาต์พุตคือ y โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned}
 x &= [i_M \quad i_{ac} \quad v_{ac}]^T \\
 u &= [d \quad v_{grid} \quad v_{pv}]^T \\
 y &= [i_{ac}]
 \end{aligned} \tag{3}$$

วงจรสมมูลของสัญญาณ AC ขนาดเล็กได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6: วงจรสมมูลสัญญาณ AC ขนาดเล็ก

จากวงจรเขียนสมการใหม่ในแบบสมการสเตทเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุม
เขียนอยู่ในรูปของ Matrix

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_M \\ \hat{i}_{ac} \\ \hat{v}_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_M} & 0 & -\frac{D'}{L_M N} \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \frac{1}{L_f} \\ \frac{D'}{NC_o} & -\frac{1}{C_o} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_M \\ \hat{i}_{ac} \\ \hat{v}_{ac} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k}{L_M} \\ 0 \\ -\frac{I_M}{NC_o} \end{bmatrix} \hat{d} \quad (4)$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{D}{L_M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{pv} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{grid}$$

และสมการสเตทของเอาต์พุตจะได้

$$y = \hat{i}_{ac} \quad (5)$$

การออกแบบระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต $y(t)$ และตัวแปรควบคุมอินพุต $u(t)$ โดยอยู่ในข้อจำกัดที่ว่าสัญญาณ Disturbance ทุกอย่างเป็นศูนย์) จากสมการที่ (4)

$$\frac{Y(s)}{U1(s)} = C(sI - A)^{-1}B1 \text{ โดย } U2(s) = U3(s) = 0 \quad (6)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมนั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส (i_{ac}) กับ Duty cycle (d) เป็นดังนี้

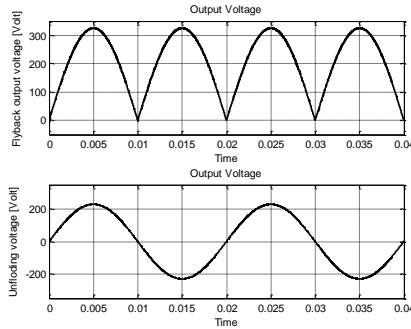
$$G_{id}(s) = \frac{-9.406 \times 10^9 + 1.006 \times 10^{15}}{s^3 + 8.239 \times 10^5 s^2 + 1.542 \times 10^{10} s + 3.63 \times 10^{14}}$$

ผลการทดลองการทำงานของแบบจำลอง

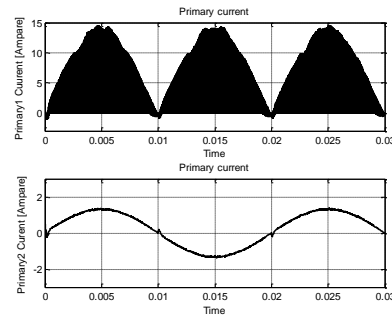
แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถให้แรงดันเอาต์พุตขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ได้ดังรูปที่ 7 และรูปคลื่นของกระแสต้านปฏิกิริยาจะเป็นรูปแบบเต็มคลื่น เนื่องจากการสวิตช์จะรับค่าของกระแสอ้างอิงที่เกิดขึ้นในวงจรส่วนหลังของวงจร EMI ซึ่งรูปคลื่นจะเป็นคลื่น



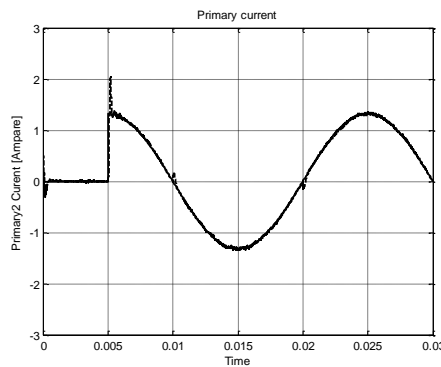
ไซน์ ในส่วนของรูปที่ 9 เป็นการสแต็ปโวลต์เพื่อดูผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ออกแบบ จะเห็นว่าสามารถให้ผลตอบสนองที่ดีคือตามสัญญาณอ้างอิงได้ในเวลาประมาณ 0.005 วินาที



รูปที่ 7: แรงดันเอาต์พุตของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และแรงดันผ่านวงจรคลี่สัญญาณ (Unfolding)



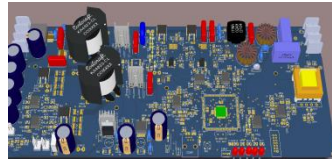
รูปที่ 8: กระแสด้านปฐมภูมิและกระแสที่ผ่านวงจรคลี่สัญญาณ



รูปที่ 9: ผลตอบสนองของกระแสขณะทำการสแต็ปโวลต์ขนาด 250 Watt

4. ผลการทดลอง

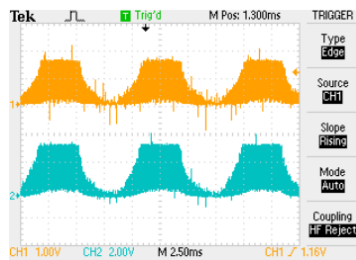
ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ต้นแบบที่พัฒนาเพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานแสดงดังรูปที่ 10 การประมวลและควบคุมการทำงานนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ16GS504



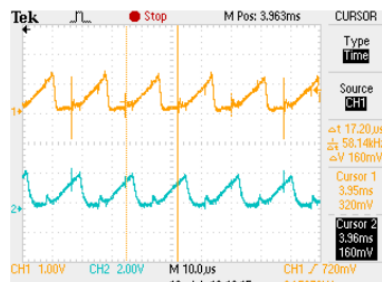
รูปที่ 10: ไมโครอินเวอร์เตอร์ต้นแบบ

ผลการทดลองการทำงานของชุดต้นแบบเป็นดังนี้

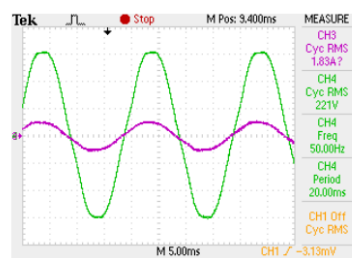
เริ่มจากการวัดค่ากระแสต้านป้อนภูมิคือ การสวิตช์ของ Q1 และ Q2 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง จะเห็นว่ารูปคลื่นการสวิตช์สอดคล้องกับผลการจำลอง ภาพขยายแสดงดังรูปที่ 12



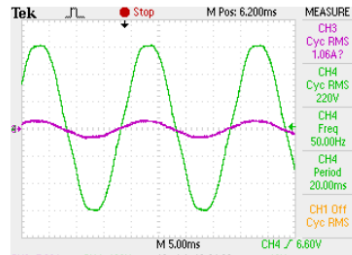
รูปที่ 11: รูปคลื่นของการสวิตช์ของ Q1 และ Q2



รูปที่ 12: ภาพขยายกระแสของรูปที่ 11



รูปที่ 13: แรงดันและกระแสขณะจ่ายโหลด 70 %



รูปที่ 14: แรงดันและกระแสขนาดจ่ายโหลด 40 %

5. สรุป

ไมโครอินเวอร์เตอร์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถให้แรงดันขนาด 220 โวลต์ ที่ความถี่ 50 Hz และสามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้ ซึ่งการทำงานเมื่อเทียบกับแบบจำลองมีความสอดคล้องกัน จึงสรุปได้ว่าไมโครอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 14: ระบบต้นแบบที่ทำการติดตั้งเพื่อทดสอบการทำงาน

บรรณานุกรม

- [1] Q. Li, and P. Wolfs, "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies With Three Different DC Link Configurations," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 3, pp. 1320-1333, May, 2008.
- [2] Edwin, F. F., et al. (2013). "Dynamic Modeling and Control of Interleaved Flyback Module Integrated Converter for PV Power Applications." Industrial Electronics, IEEE Transactions on PP(99): 1-1.
- [3] Young-Ho, K., et al. (2013). "A New Control Strategy for Improving Weighted Efficiency in Photovoltaic AC Module-Type Interleaved Flyback Inverters." Power Electronics, IEEE Transactions on 28(6): 2688-2699.
- [4] สวีวัฒน์ ตัน. (2537). เทคนิคการออกแบบสวิตช์เพาเวอร์ซัพพลาย. จัดพิมพ์โดย บริษัท เอนเทลไทย จำกัด, กรุงเทพฯ.