

การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกิริตภายใต้เงื่อนไข
ความเข้มแสงต่ำเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบ
การผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบกระจายที่ติดตั้งบนหลังคา
Input power control of grid-connected inverters under a low irradiance
condition to improve efficiency and power quality for distributed
rooftop photovoltaic systems

กิตติพงศ์ คล้ายดี¹ ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธา^{2*} สุรพล โรจนประดิษฐ์² สยามรัฐ เพิกอารมณ์²
อาณน พ่วงชิงงาม² วิสุทธิ ตันติรุ่งเรือง² ปฏิวัติ บุญมา² และ นภัทร วัจนเทพินทร³
Kittiphong Khaidee¹, Paiboon Kiatsookkanat^{2*}, Surapol Rochanapratishtha², Siamrat Phonkapom²,
Arnon Pungching-ngam², Wisut Tantirungrueng², Patiwat Boonma² and Napat Watjanatepin³

บทคัดย่อ

จากแนวโน้มระบบการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาที่เพิ่มขึ้นและสมรรถนะที่ลดลงของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกิริตในช่วงโหลดน้อยจากความเข้มแสงต่ำ บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณภาพไฟฟ้าของระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกิริตที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบกระจายโดยอาศัยการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ในช่วงความเข้มแสงต่ำ ในบทความได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst เพื่อเป็นข้อมูลในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์อย่างเหมาะสมตามกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง นอกจากนั้นในบทความนี้ยังได้พิจารณากำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันต่อกระแสฮาร์มอนิกด้วย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าด้านออกในช่วงความเข้มแสงต่ำให้สูงขึ้นจาก 63.29 วัตต์ เป็น 76.58 วัตต์ ทำให้ประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าระบบการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 21 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นผลการทดสอบยังยืนยันให้เห็นด้วยว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในช่วงความเข้มแสงต่ำจะมีผลทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสลดลงจากเดิม 18 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 11.25 เปอร์เซ็นต์ อีกด้วย

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ คุณภาพไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกิริต ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

³ Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University

* Corresponding author. E-mail: Paiboon.k@rmutsb.ac.th

Abstract

From increasing the trend of the rooftop photovoltaic (PV) system and reducing the performance of grid-connected inverters with low irradiation, this paper presents the efficiency and power quality improvements of the grid-connected PV system by controlling the input power of inverters under low irradiance conditions. The relationship between efficiency and power was utilized by using PVsyst simulation to control the proper inverter parallel following the power of solar cell panels on the changing irradiance. Moreover, in this paper, the different output power of inverters on the total harmonic distortion of currents (THDi) was also considered. The research results revealed that the output power of inverters with the proposed method under low irradiance conditions could be increased from 63.29 W to 76.58 W. Consequently, the efficiency of the proposed method was more than that of the conventional distributed PV system. As a result, it could be able to boost the energies by 21%. Furthermore, the experimental results also clearly confirmed that increasing the input power under low irradiance conditions affects the decrease of the THDi from 18% to 11.25%.

Keywords: efficiency, power quality, grid-connected inverter, photovoltaic system

บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกิดเป็นระบบที่ถูกพัฒนามาจากระบบผลิตไฟฟ้าแบบโดดเดี่ยวที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานดัง (Figure 1) อุปกรณ์หลักจะประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกิด ระบบผลิตไฟฟ้าแบบนี้หากพิจารณาตามลักษณะการใช้ อินเวอร์เตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็นแบบศูนย์รวม (central system) และแบบกระจาย (distributed system) (Kjaer, Pederson, & Blaabjerg, 2005) ระบบผลิตไฟฟ้าแบบศูนย์รวมจะใช้อินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด ซึ่งข้อดีของระบบนี้จะมีต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ของระบบจะต่ำมาก เนื่องจากหากอินเวอร์เตอร์เสีย ระบบจะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ส่วนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายเป็นระบบที่ถูกพัฒนามาจากระบบแบบศูนย์รวมเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและความ

น่าเชื่อถือได้เพิ่มมากขึ้น ระบบนี้จะเปลี่ยนจากการใช้อินเวอร์เตอร์ตัวเดียวมาใช้หลาย ๆ ตัวแทน ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ตัวหนึ่งตัวใดเสียระบบก็ยังคงผลิตไฟฟ้าต่อไปได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าแบบศูนย์รวม

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกิดจะมุ่งเน้นที่ประสิทธิภาพเป็นสำคัญซึ่งสามารถสังเกตได้จากรายละเอียดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกิดที่ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะแสดงข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพเพื่อดึงดูดความสนใจ ดังนั้นจึงมีผู้สนใจมากมาย (Lai, & Ngo, 1995; Gonzalez, Lopez, Sanchis, & Marroyo, 2007; Jang, Jovanovic, & Dillman, 2010; Kuo, & Lu, 2012; Huang et al., 2016) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ให้เพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 1-2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อินเวอร์เตอร์เหล่านี้มีประสิทธิภาพที่สูงมากถึงประมาณ 97-98 เปอร์เซ็นต์

(Teodorescu, Liserre, & Rodriguez, 2011) นอกจากนั้นงานวิจัยของ Goud, & Gupta (2016) ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสงแตกต่างกันเฉพาะในช่วงความเข้มแสงสูง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานจริงจะมีความเข้มแสงต่ำด้วย เมื่อนำมาใช้งานจริงทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะต่ำกว่าข้อมูลที่แสดงไว้ดังแสดงผลการศึกษาใน Watjanatepin, & Boonmee (2015) นอกจากนั้นในงานวิจัยของ Ketjoy, Chamsa-ard, & Mensin (2021) ยังได้ข้อสรุปที่สำคัญว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์หากอินเวอร์เตอร์ทำงานที่ กำลังไฟฟ้าค่าต่ำ (light load) หรือความเข้มแสงน้อย (low irradiation) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่าต่ำ

การปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในช่วงโหลดน้อยมีผู้สนใจมากมาย งานวิจัยของ Zhang, Chen, Gao, Mo, & Qian (2011) ได้ขยายแนวคิดการควบคุมความถี่การสวิตช์ในช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำของ Li, Lee, Xu, & Wang (2009) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบอินเทอร์ลีฟ (interleave) ซึ่งเป็นวงจรส่วนหน้าของอินเวอร์เตอร์ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ Feeney, & Duffy, (2012); Zhang, Zhang, & Yang (2015) เพื่อลดค่าระลอกของกระแสทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ในขณะที่งานวิจัยของ Jang, Jovanovic, & Dillman (2010) ได้แสดงวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในช่วงโหลดน้อยด้วยการเพิ่มชุดเก็บ

พลังงานชั่วคราวเพื่อลดค่าสูญเสียในช่วงหยุดนำกระแสของสวิตช์ไวงาน นอกจากนั้นงานวิจัยของ Hu, Al-Hoor, Kutkut, Batarseh, & Shen (2010) ยังได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพโดยควบคุมให้อินเวอร์เตอร์บ่อนกระแสไปยังกริดเป็นช่วง (pulse skipping) ช่วงที่อินเวอร์เตอร์ไม่บ่อนกระแสไปยังกริดจะอาศัยการสะสมพลังงานมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุภายใน หลังจากนั้นเมื่อตัวเก็บประจุมีพลังงานเพียงพอถึงจะบ่อนกระแสออกไปยังกริด ลักษณะดังกล่าวทำให้ช่วงโหลดน้อยจากความเข้มแสงต่ำ อินเวอร์เตอร์จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในช่วงความเข้มแสงน้อยนอกจากจะทำให้อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพต่ำแล้วยังมีผลทำให้กระแสฮาร์มอนิกมีค่าสูงอีกด้วยดังแสดงในงานวิจัยของ Watjanatepin, & Prakorn, (2012); Du, Lu, James, & Cornforth (2013)

การปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยอาศัยการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเข้ามีผู้สนใจศึกษาเช่นเดียวกัน งานวิจัยของ Kuo, & Lu (2012) ได้แสดงวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้แต่ละตัวทำงานอย่างเหมาะสมที่เอื้อให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง แต่ในบทความไม่ได้แสดงให้เห็นว่าได้ใช้วิธีการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์อย่างไร และแนวคิดการควบคุมด้วยกำลังไฟฟ้าจะมีข้อด้อยในกรณีที่มิเมฆบังจะทำให้อินเวอร์เตอร์บางตัวหยุดทำงานในเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าค่าต่ำและเมื่อเมฆเคลื่อนที่ไปจะใช้เวลาลากพักกว่าที่อินเวอร์เตอร์จะกลับมาทำงานใหม่อีกครั้งจึงทำให้เสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้า นอกจากนั้นงานวิจัยของ Alahmad, Chaaban, & Lau (2011); Huang et al. (2016) ได้นำเสนอวิธีการควบคุมการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์

อย่างเหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในบทความดังกล่าวยังไม่มีการทดสอบจริงที่ใช้ยืนยันกับแนวคิดที่นำเสนอ งานวิจัยของ Fang, Yang, & Yan (2022) ได้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าในเชิงพลวัต (dynamic) โดยวิธีการตัดต่อวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการใช้การสวิตช์แบบเมทริกซ์ในแต่ละภาคต่าง ๆ (scenario) เพื่อปรับปรุงให้กำลังไฟฟ้าด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดซึ่งสามารถปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นได้ 6.43 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามบทความนี้ไม่ได้โฟกัสที่กำลังไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในช่วงโหลดน้อย

จากปัญหาโหลดน้อยในช่วงความเข้มแสงต่ำที่ได้กล่าวมาในข้างต้นงานวิจัยนี้เสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณภาพไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อนกริดโดยอาศัยการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเข้าอย่างง่ายที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์แบบกระจายเพื่อเอื้อต่อการทำงานให้มีประสิทธิภาพ

สูงขึ้นในขณะเดียวกันก็จะปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้นด้วย โดยมีประเด็นหลักที่นำเสนอ ดังนี้

1. วิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อนกริดต่อประสิทธิภาพ
2. จำลองพฤติกรรมความเข้มแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาและประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ต่อกำลังไฟฟ้าโดยอาศัยโปรแกรม PVsyst
3. นำเสนอแนวคิดการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเข้าอินเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในช่วงความเข้มแสงต่ำและแสดงวงจรที่สร้างขึ้น
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพและกระแสฮาร์มอนิกอินเวอร์เตอร์ของระบบที่นำเสนอกับระบบแบบดั้งเดิมด้วยผลการทดสอบจริง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อนกริด

ระบบนี้หากแบ่งตามลักษณะการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือแบบศูนย์รวมและแบบกระจาย

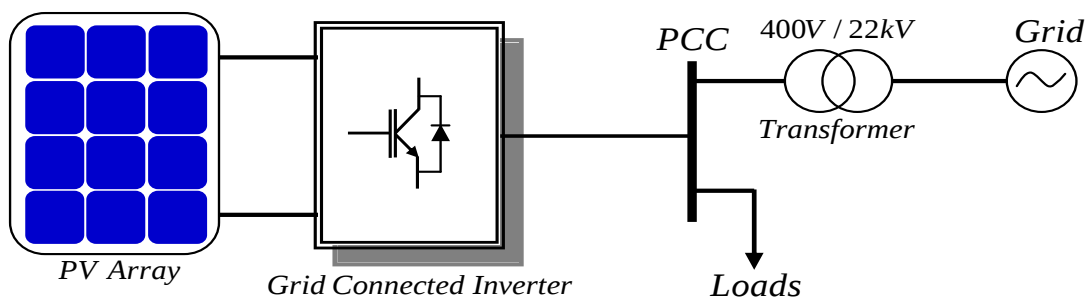


Figure 1 The grid photovoltaic system.

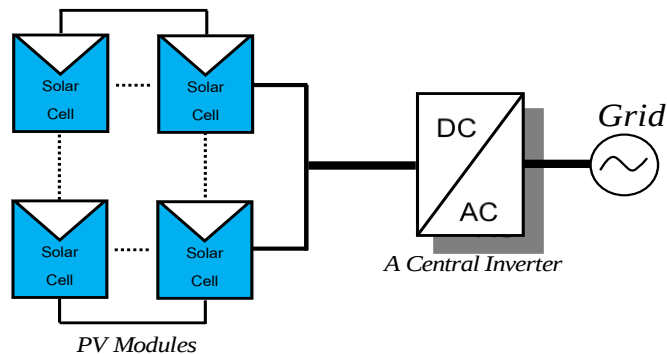


Figure 2 The grid photovoltaic system with a central inverter.

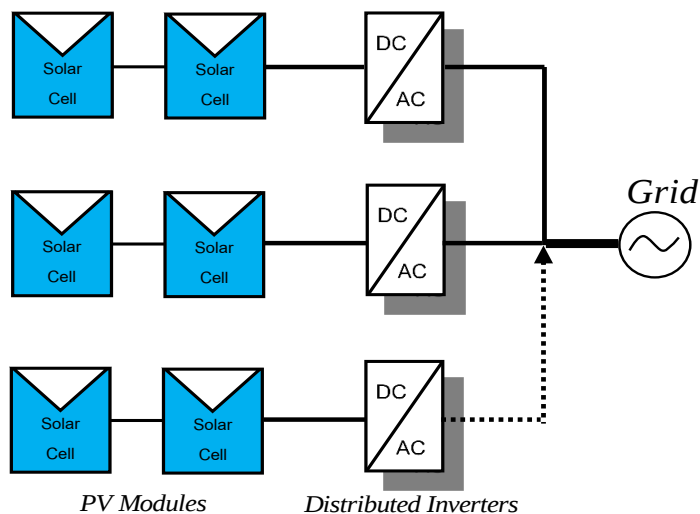


Figure 3 The grid photovoltaic system with distributed inverters.

ระบบผลิตไฟฟ้าแบบศูนย์รวมแสดง ดัง (Figure 2) โดยทั่วไปฟังก์ชันของอินเวอร์เตอร์จะเท่ากับ ผลรวมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W_p) ทั้งหมด การเลือกต่อขนานหรืออนุกรมของแผง เซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะแรงดันและ กระแสของอินเวอร์เตอร์ที่ได้ระบุไว้ในรายละเอียด (Figure 3) แสดงระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย ระบบนี้ จะมีอินเวอร์เตอร์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายชุด

จำนวนชุดจะขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ โดยแต่ละชุด จะแยกการทำงานอิสระต่อกัน

2. ข้อกำหนดคุณภาพไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกกริด

อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกกริดในสภาวะ การทำงานที่พิกัดจะสร้างกระแสที่มีลักษณะเป็น รูปคลื่นไซน์ อย่างไรก็ตามในขณะที่อินเวอร์เตอร์ ทำงานในช่วงโหลดน้อยจากความเข้มแสงต่ำ กระแส

จะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์หรือมีองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย ซึ่งสามารถแสดงกระแสในลักษณะดังกล่าวได้ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ (Hart, 2011) ดังสมการ (1)

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{n,rms} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

โดยที่ I_0 คือ กระแสขององค์ประกอบไฟตรง

จากสมการ (1) เมื่อกระแสมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกจะส่งผลให้กระแสค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (I_{rms}) ไม่เท่ากับกระแสที่ความถี่หลักมูล (I_1) ดังสมการ (2)

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms}^2} \neq I_1 \quad (2)$$

จากพฤติกรรมของกระแสที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิก ทำให้เกิดเทอมของตัวประกอบกำลังผิดเพี้ยน (distortion power factor: DF) จึงส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าลดลง และไม่เท่ากับตัวประกอบกำลังดิสเพลสเมนต์ (displacement power factor: DPF) ดังแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (3)

$$PF = DPF * DF = \cos(\theta_1 - \phi_1) \frac{I_1}{I_{rms}} \quad (3)$$

ร้อยละกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับและค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้า (total harmonic distortion: THD) (Hart, 2011) ดังสมการ (4-6)

$$\%I_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100 \quad (4)$$

$$\%THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1}^N I_n^2}{I_1^2}} \times 100 = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \times 100 \quad (5)$$

และจากสมการ (5) เมื่อแทนในสมการ (3) จะได้ตัวประกอบกำลังที่สัมพันธ์กับ THDi ดังสมการ (6)

$$PF = \cos(\theta_1 - \phi_1) \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (6)$$

สำหรับประเทศไทยการเชื่อมต่อกริดจะมีข้อกำหนดหลัก ๆ อยู่ด้วยกันสองหน่วยงาน คือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) และการไฟฟ้านครหลวง (MEA) ซึ่งทั้งสองหน่วยก็มีข้อกำหนดการเชื่อมต่อกริดมากมายแต่ในบทความนี้จะโฟกัสเฉพาะคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลมาจากกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น ดังนั้นจากสมการ (4-5) สามารถนำมาเชื่อมโยงกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อกริดของการไฟฟ้านครหลวงได้ดัง (Table 1)

Table 1 The grid code of MEA for harmonic currents in each order.

odd orders	limited current (%)	even orders	limited current (%)
3-9	4.000	2-10	1.000
11-15	2.000	12-16	0.500
17-21	1.500	18-22	0.375
23-33	0.600	24-34	0.150
≥35	0.300	≥36	0.075
total harmonic distortion of currents (THD) 5%			

สำหรับคุณภาพไฟฟ้าของกระแสฮาร์โมนิกตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกริดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะแตกต่างจากการไฟฟ้านครหลวงตรงที่จะพิจารณาขนาดของกระแสในแต่ละอันดับไม่ได้พิจารณาเป็นค่าร้อยละ (เปอร์เซ็นต์) ดัง (Table 2)

เมื่อพิจารณาข้อมูลใน (Table 1-2) พบว่าอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดขนาดเล็กที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งบนหลังคาจะมีกำลังไฟฟ้า

ค่าต่ำ กระแสไม่สูงมากซึ่งอาจทำให้ไม่เข้าเงื่อนไขที่ต้องควบคุมให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แต่จะต้องควบคุมให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวง เนื่องจากขีดจำกัดของกระแสในแต่ละอันดับจะกำหนดเป็นค่าร้อยละ ซึ่งอันดับ 3, 5, 7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ และ THDi จะต้องไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

Table 2 Harmonic currents in each order with the grid code of PEA at point common coupling 400V (230V).

orders	limited currents (A)	orders	limited currents (A)	orders	limited currents (A)
2	48	8	9	14	5
3	34	9	8	15	5
4	22	10	7	16	5
5	56	11	19	17	6
6	11	12	6	18	4
7	40	13	16	19	6

เมื่อพิจารณาข้อมูลใน (Table 1-2) พบว่าอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดขนาดเล็กที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งบนหลังคาจะมีกำลังไฟฟ้าค่าต่ำ กระแสไม่สูงมาก ซึ่งอาจทำให้ไม่เข้าเงื่อนไขที่ต้องควบคุมให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แต่จะต้องควบคุมให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวง เนื่องจากขีดจำกัดของกระแสในแต่ละอันดับจะกำหนดเป็นค่าร้อยละซึ่งอันดับ

3, 5, 7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ และ THDi จะต้องไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

วิธีการศึกษา

1. การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดต่อประสิทธิภาพ

1.1 ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริด

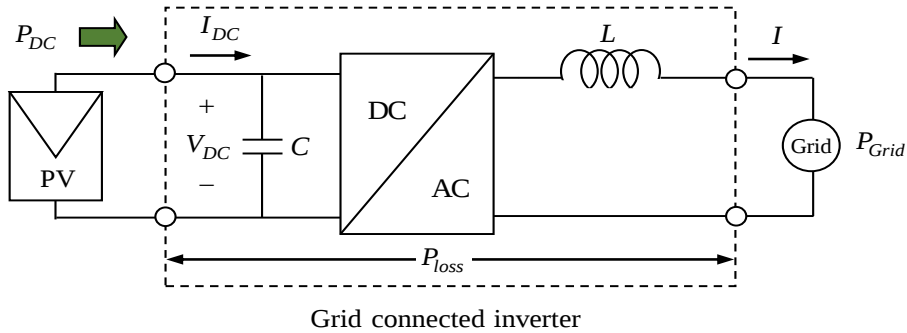


Figure 4 The structure of a grid connected inverter for the PV system.

จาก (Figure 4) จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ (P_{in}) จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (P_{DC}) ที่ขึ้นกับกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (7)

$$P_{in} = P_{DC} = V_{DC} I_{DC} \quad (7)$$

โดยที่ V_{DC} และ I_{DC} คือ แรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามลำดับ ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงด้านออกจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งหาได้จาก

$$P_{Grid} = P_{AC} = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \phi_n) = V_{rms} I_{rms} PF \quad (8)$$

โดยที่ n คือ อันดับฮาร์มอนิก θ คือ มุมเฟสของแรงดัน ϕ คือ มุมเฟสของกระแส V_{rms} และ I_{rms} คือ แรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอสด้านออก ตามลำดับ

จากสมการที่ (8) เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด (real power) อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกิริตมักถูกออกแบบให้แรงดันกับกระแสมีลำดับเฟสตรงกันหรือตัวประกอบกำลังดีสเพนดเมนต์ ในสมการ (3) เป็นหนึ่ง

(DPF=1) และหากแรงดันของระบบไฟฟ้ามีเฉพาะความถี่หลักมูล ($V_{rms} = V_1$) แต่กระแสด้านออกมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย ($I_{rms} \neq I_1$) จะได้กำลังไฟฟ้าจริงด้านออก ดังสมการ (9)

$$P_{Grid} = V_1 I_{rms} \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \cos(\theta_1 - \phi_1) = V_1 I_{rms} \frac{I_1}{I_{rms}} \cos(\theta_1 - \phi_1) = V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \phi_1) = P_1 \quad (9)$$

โดยที่ V_1 , I_1 และ P_1 คือ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลตามลำดับ

เมื่อพิจารณาสมการ (9) ซึ่งให้เห็นว่าในกรณีที่แรงดันด้านออกมีเฉพาะความถี่หลักมูลกำลังไฟฟ้าด้านออกจะมีเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลเท่านั้น

ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ทั้งกรณีที่กระแสมีความผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปคลื่นไซน์หรือมีองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกอยู่ด้วย ($I_{rms} \neq I_1$) และกรณีที่ไม่มีกระแส

ฮาร์มอนิกจะให้กำลังไฟฟ้าด้านออกเหมือนกัน แต่ตัวประกอบกำลังจะแตกต่างกัน กล่าวคือตัวประกอบกำลังที่มีกระแสฮาร์มอนิกจะมีค่าต่ำกว่า ($PF \neq DPF$) ในขณะที่กระแสอาร์เอ็มเอสจะมีค่าสูงกว่า ($I_{rms} > I_1$)

ตามสมการ (2) จึงมีผลให้อินเวอร์เตอร์มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (P_{loss}) มากกว่ากรณีที่มีกระแสเฉพาะความถี่หลักมูล เมื่อเชื่อมโยงไปยังประสิทธิภาพ (η) ของระบบจะแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการ (10)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{DC} - P_{loss}}{P_{DC}} = \frac{P_{Grid}}{P_{DC}} = \frac{V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \phi_1)}{V_{DC} I_{DC}} = \frac{P_1}{V_{DC} I_{DC}} \quad (10)$$

2. ความเข้มแสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ต่อกำลังไฟฟ้า

2.1 ความเข้มแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา

ความเข้มแสงจะเป็นตัวกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นในแต่ละช่วงเวลาหากทราบความเข้มแสงก็จะประเมิน

กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงได้ โดยช่วงเช้าและเย็นความเข้มแสงจะน้อย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจะมีค่าต่ำแต่ในช่วง 8.00-16.25 น. ความเข้มแสงจะสูงจึงได้กำลังไฟฟ้าค่าสูง ดังแสดงการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst (PVsyst, 2017) ดัง (Figure 5)

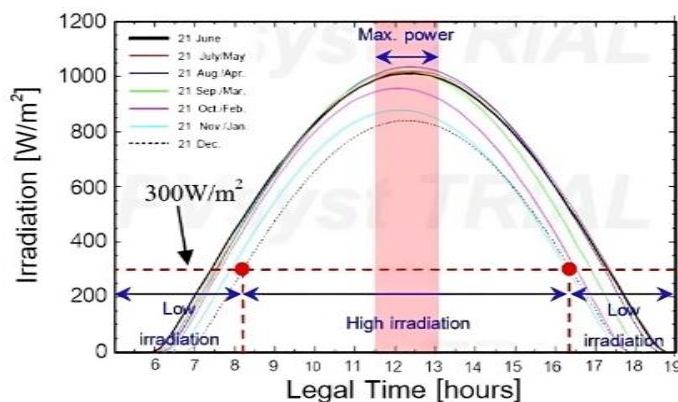


Figure 5 The irradiation with south during 5.00 AM-19.00 PM in each month by using PVsyst.

จาก (Figure 5) แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงจะเริ่มมีตั้งแต่ประมาณ 6.00 น. และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยจะมีค่าสูงสุด ในช่วงเวลาประมาณ 11.30-13.00 น. (แรงแดดด้วยสีชมพู) ความเข้มสูงสุดในรอบปีประมาณ 1050 วัตต์ต่อตารางเมตร จะเกิดขึ้นในช่วงเดือนสิงหาคมและเมษายน อย่างไรก็ตามในช่วงเดือน

ธันวาคมจะมีความเข้มแสงน้อยที่สุด เมื่อเชื่อมโยงความเข้มแสงกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_m) จะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงในแต่ละช่วงเวลาก็ได้ และที่สำคัญสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้กำหนดช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมของอินเวอร์เตอร์แบบกระจายที่เสนอได้

2.2 ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ต่อกำลังไฟฟ้า

อินเวอร์เตอร์ทั่วไป ๆ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่การทำงานที่พิกัด แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ประมาณ 30-70 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ดัง (Figure 6) เนื่องจากกำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ซึ่งจะแปรตามความเข้มแสง โดยส่วนใหญ่แผง

เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าออกมาต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบุไว้ในรายละเอียดของแผง (maximum power) ดังนั้นจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยส่วนใหญ่จะไม่ได้ทำงานที่พิกัดและเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด บริษัทที่ผลิตอินเวอร์เตอร์จึงออกแบบให้อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงอยู่ในช่วงดังกล่าว ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 96.50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ต่ำสุดจะอยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของทั้งคู่จึงมีความแตกต่างกันประมาณ 16.50 เปอร์เซ็นต์

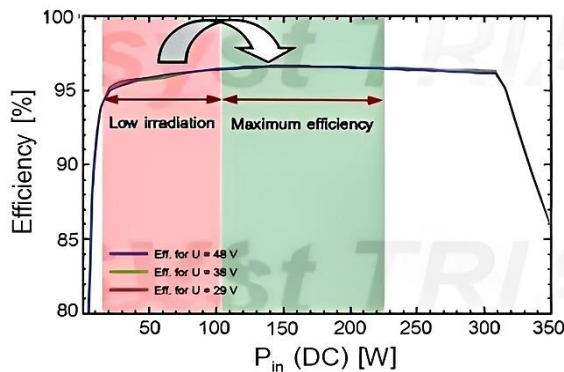


Figure 6 The relationship between efficiency and input power of a 300W inverter by using PVsyst.

3. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีการควบคุมกำลังไฟฟ้านำเข้าที่นำเสนอ

จาก (Figure 3) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตามแนวคิดที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะได้ระบบผลิตไฟฟ้าที่เสนอดัง (Figure 7)

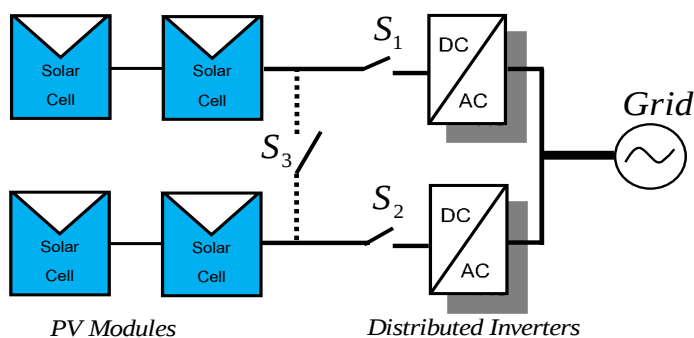


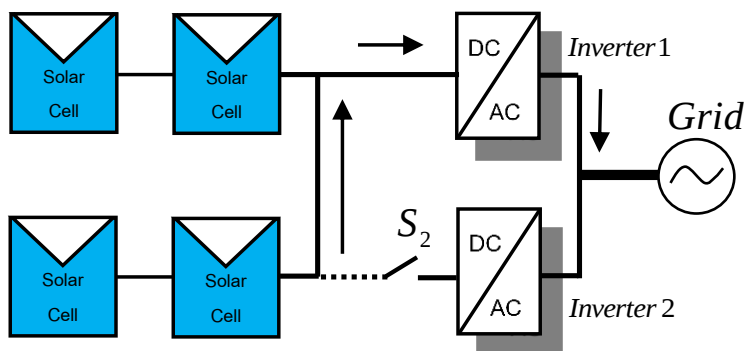
Figure 7 The proposed photovoltaic system.

(Figure 7) คือระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ตามค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงอินเวอร์เตอร์จะทำงานสองตัว แต่ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำอินเวอร์เตอร์จะทำงานเพียงแค่ตัวเดียว

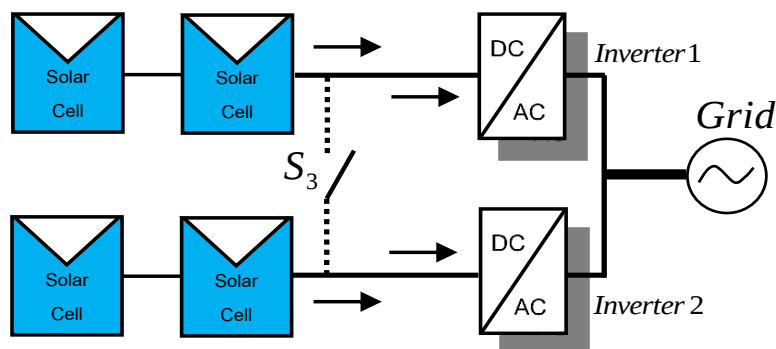
3.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเข้าอินเวอร์เตอร์

หากพิจารณากำลังไฟฟ้าจาก (Figure 6) จะพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 6.00-18.00 น. ซึ่งช่วงเวลา 6.00-8.00 น. จะมีความเข้มแสงต่ำกว่า 300 วัตต์ต่อตารางเมตร

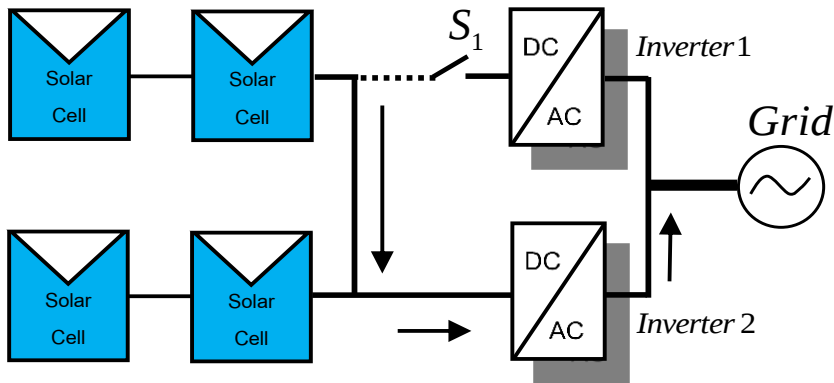
แต่ในช่วง 8.00-16.25 น. จะมีค่าสูงกว่า 300 วัตต์ต่อตารางเมตร และความเข้มแสงจะมีค่าต่ำกว่า 300 วัตต์ต่อตารางเมตร อีกครั้งในช่วง 16.25-18.00 น. ดังนั้นหากต้องการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเข้าอินเวอร์เตอร์ตามกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถกำหนดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ตามช่วงเวลาได้ และสามารถแบ่งโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า ดัง (Figure 7) ได้ 3 โหมด คือ โหมดที่ 1 อินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ทำงานเพียงตัวเดียว โหมดที่ 2 อินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวทำงานพร้อมกัน และโหมดที่ 3 อินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ทำงานเพียงตัวเดียว ดัง (Figure 8)



(a) Mode 1 during 6.00-8.00 AM (low irradiation).



(b) Mode 2 during 8.00 AM-4.25 PM (high irradiation).



(c) Mode 3 during 4.25 PM-18.00 PM (low irradiation)

Figure 8 Operating control of inverters depending on time schedules.

จาก (Figure 8) ในช่วงเช้าและเย็นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำ จะต้องควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพียงตัวเดียวซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นสองเท่า เมื่อนำไปเชื่อมโยงกับ (Figure 5) จะพบว่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะเข้าสู่ย่านประสิทธิภาพสูง แต่พอถึงช่วงเวลา 8.00-16.25 น. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าสูง จึงต้องควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานร่วมกันเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสเกินพิกัดจนอินเวอร์เตอร์ได้รับความเสียหายหรือ MPPT ของอินเวอร์เตอร์

ควบคุมเข้าสู่โหมดการหรี่กำลังไฟฟ้า (dimming) ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ลดลง นอกจากนั้นเพื่อให้อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงสถานะบ่อย ๆ และอินเวอร์เตอร์มีวัฏจักรการทำงานที่เท่า ๆ กัน โหมด 1 และ 3 จะสลับกันวันเว้นวัน เส้นไขการการทำงานสามารถแสดงได้ ดัง (Table 3)

3.2 การทำให้เป็นจริงด้วยชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์

จากแนวทางการควบคุมกำลังไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่กล่าวมาในเบื้องต้นสามารถแสดงชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ดัง (Figure 9)

Table 3 Relationship between switching state and operation of inverters depending on time schedules.

operating modes	switching function			input power of inverters		during time in each day
	S1	S2	S3	No. 1	No. 2	
1	on	off	on	PV1+2	0	6.00 AM-8.00 AM of the first day
2	on	on	off	PV1	PV2	8.00 AM-4.25 PM
3	off	on	on	0	PV1+2	4.25 PM-8.00 AM of the second day
2	on	on	off	PV1	PV2	8.00 AM-4.25 PM
1	on	off	on	PV1+2	0	4.25 PM-8.00 AM of the third day

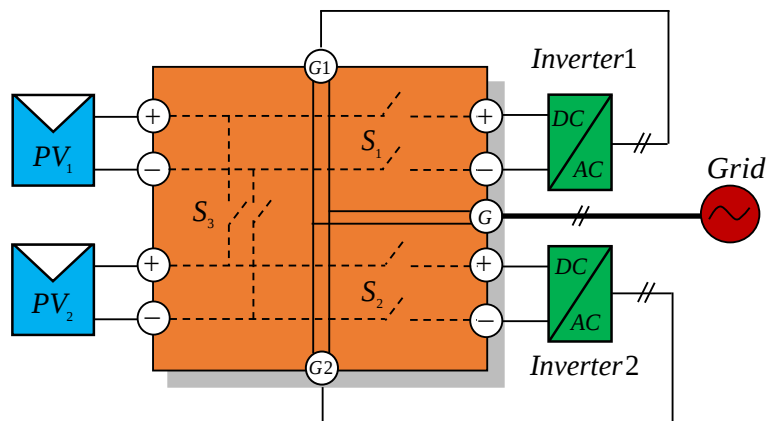


Figure 9 The proposed power controller.

จาก (Figure 9) เพื่อควบคุมสวิตช์ตาม (Table 3) สามารถอธิบายการทำงานของสวิตช์คร่าวๆ ได้ดังนี้ ในช่วงเช้าสวิตช์ S3 จะนำกระแสและเมื่อควบคุมให้สวิตช์ S1 นำกระแส กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์ PV₁ และ PV₂ ทั้งสองแผงจะส่งผ่านอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ไปยังระบบของการไฟฟ้า หลังจากนั้นในช่วงสายจะควบคุมให้สวิตช์ S3 หยุดนำกระแส แผงเซลล์แสงอาทิตย์ PV₁ และ PV₂ จึงแยกออกจากกัน ในขณะเดียวกันจะควบคุมให้สวิตช์ S2 นำกระแสแทน ทำให้ในช่วงนี้อินเวอร์เตอร์

ตัวที่ 1 ยังคงทำงานเหมือนเดิมและมีอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ทำงานร่วมด้วย พอถึงเวลาในช่วงเย็นสวิตช์ S3 จะถูกควบคุมให้นำกระแสอีกครั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ PV₁ และ PV₂ จึงต่อขนานกันอีกครั้งหนึ่ง แต่ช่วงนี้จะควบคุมให้สวิตช์ S1 หยุดนำกระแส อินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 จึงหยุดทำงานและปล่อยให้อินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ทำงานต่อไป ลักษณะดังกล่าวจะทำให้อินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวมีวัฏจักรการทำงานเท่า ๆ กัน ตามที่กำหนดไว้ซึ่งจะได้ไดอะแกรมที่ใช้ควบคุม ดัง (Figure 10)

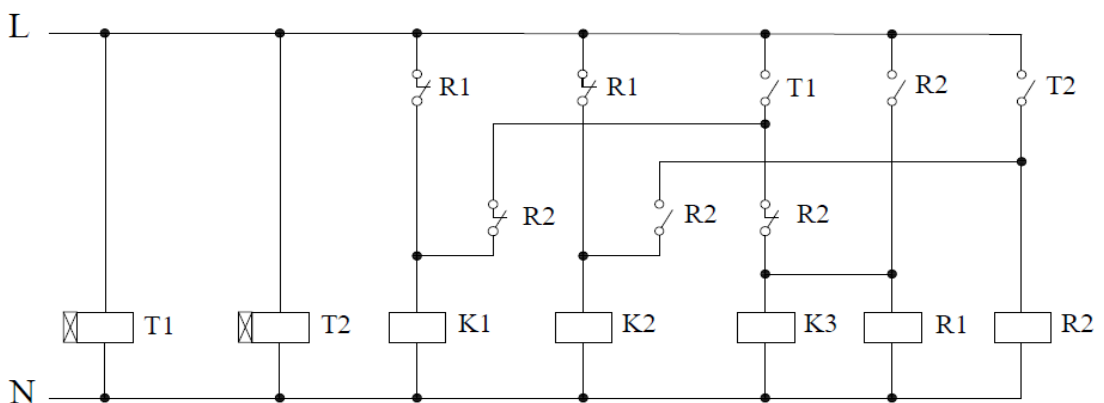


Figure 10 The proposed diagram of the input power control in (Figure 9).

(Figure 10) คือวงจรควบคุมการทำงานซึ่งจะแบ่งช่วงเวลาการทำงานเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 6.00-8.00 น., 8.00-16.25 น. และ 16.25-6.00 น. ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

1. โหมดที่ 1 ในช่วงเวลา 6.00-8.00 น. เมื่อถึงเวลา 6.00 น. ไทม์เมอร์ T2 จะทำงานและหน้าสัมผัสรีเลย์ของ T2 จะทำงานด้วยจึงส่งผลให้แมคเนติกส์คอนแทคเตอร์ K2 และ K3 ทำงาน และทำให้ทั้งสวิตช์ S1 และ S3 ใน (Figure 9) นำกระแส โดยสวิตช์ S3 จะนำกระแสจนกระทั่งถึงเวลา 8.00 น. จึงหยุดนำกระแสตามเวลาที่ตั้งไว้

2. โหมดที่ 2 จะทำงานในช่วงเวลา 8.00-16.25 น. เมื่อถึงเวลา 8.00 น. ไทม์เมอร์ T1 จะทำงานและส่งผลให้รีเลย์ของ T1 ทำงานมีผลให้แมคเนติกส์คอนแทคเตอร์ K1 และ K2 ทำงาน จึงทำให้สวิตช์ S1 นำกระแสต่อไป และสวิตช์ S2 ใน (Figure 9) จะนำกระแสแทนสวิตช์ S3 และเมื่อถึงเวลา 16.25 น. สวิตช์ S1 จะหยุดนำกระแสตามเวลาที่ตั้งไว้

3. โหมดที่ 3 ในช่วงเวลา 16.25-8.00 น. เมื่อถึงเวลา 16.25 น. ทั้งไทม์เมอร์ T1 และ T2 จะไม่ทำงานและส่งผลให้รีเลย์ช่วยทั้ง R1 และ R2 หยุดทำงานตามไปด้วย ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้แมคเนติกส์คอนแทคเตอร์ K1 และ K3 ทำงาน และมีผลให้สวิตช์ S2 นำกระแสต่อไป โดยที่สวิตช์ S3 จะกลับมานำกระแสใหม่อีกครั้ง

การทำงานของวงจรควบคุมเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จะทำซ้ำในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ และสามารถแสดงโฟชาร์ตได้

ดัง (Figure 11) อย่างไรก็ตามหากต้องการปรับช่วงเวลาใหม่เพื่อให้สอดคล้องตามเงื่อนไขความเข้มแสงในแต่ละฤดูกาลก็สามารถทำได้

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

เพื่อยืนยันแนวคิดที่เสนอ ดังนั้นจะแสดงผลการทดสอบในช่วงความเข้มแสงน้อย โดยในที่นี้จะกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (W_p) 600 วัตต์ เท่ากันทั้ง 3 กรณี โดยจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (W_p) ขนาด 300 วัตต์ จำนวนสองแผงต่อขนานกัน และเพื่อให้การทดสอบในแต่ละกรณีมีเงื่อนไขเดียวกัน ทั้งความเข้มแสงและอุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นจะทดสอบพร้อมกันทั้ง 3 กรณี ซึ่งประกอบด้วย 1) กรณีอินเวอร์เตอร์ 600 วัตต์ ตัวเดียว เชื่อมต่อกับแรงดันเฟส A 2) กรณีอินเวอร์เตอร์ 300 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ซึ่งเป็นแบบดั้งเดิมที่ไม่มีการควบคุม เชื่อมต่อกับแรงดันเฟส B และ 3) กรณีอินเวอร์เตอร์ 300 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ที่เสนอเชื่อมต่อกับแรงดันเฟส C ในที่นี้จะใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ Fluke 435 series II ที่สามารถวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟสได้พร้อม ๆ กัน ดัง (Figure 12) จึงสามารถนำผลกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงความเข้มแสงต่ำทั้ง 3 กรณีมาเปรียบเทียบกันได้ โดยจะบันทึกค่าทางไฟฟ้าทุก ๆ 1 วินาที ตั้งแต่เวลา 16.25-18.00 น. ดัง (Figure 13-16) รายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ ดัง (Table 4-5) ตามลำดับ

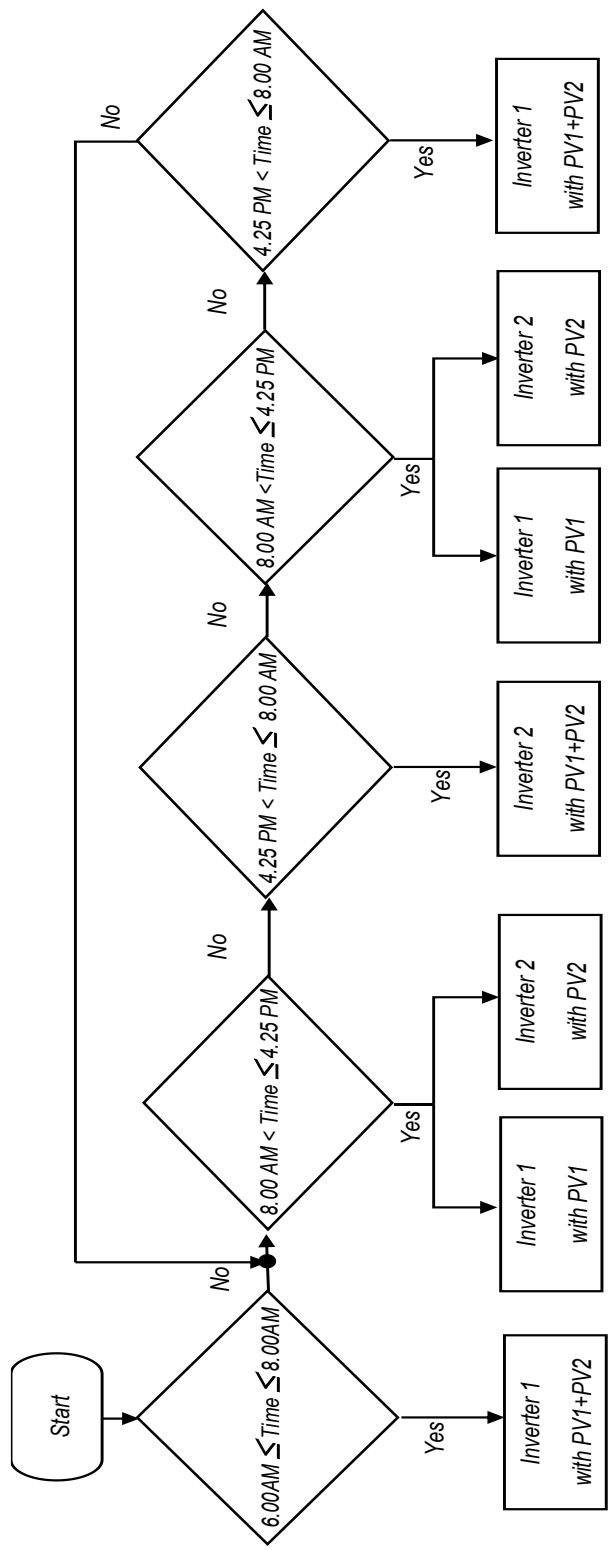


Figure 11 Flow chart of the input power control with the proposed method.

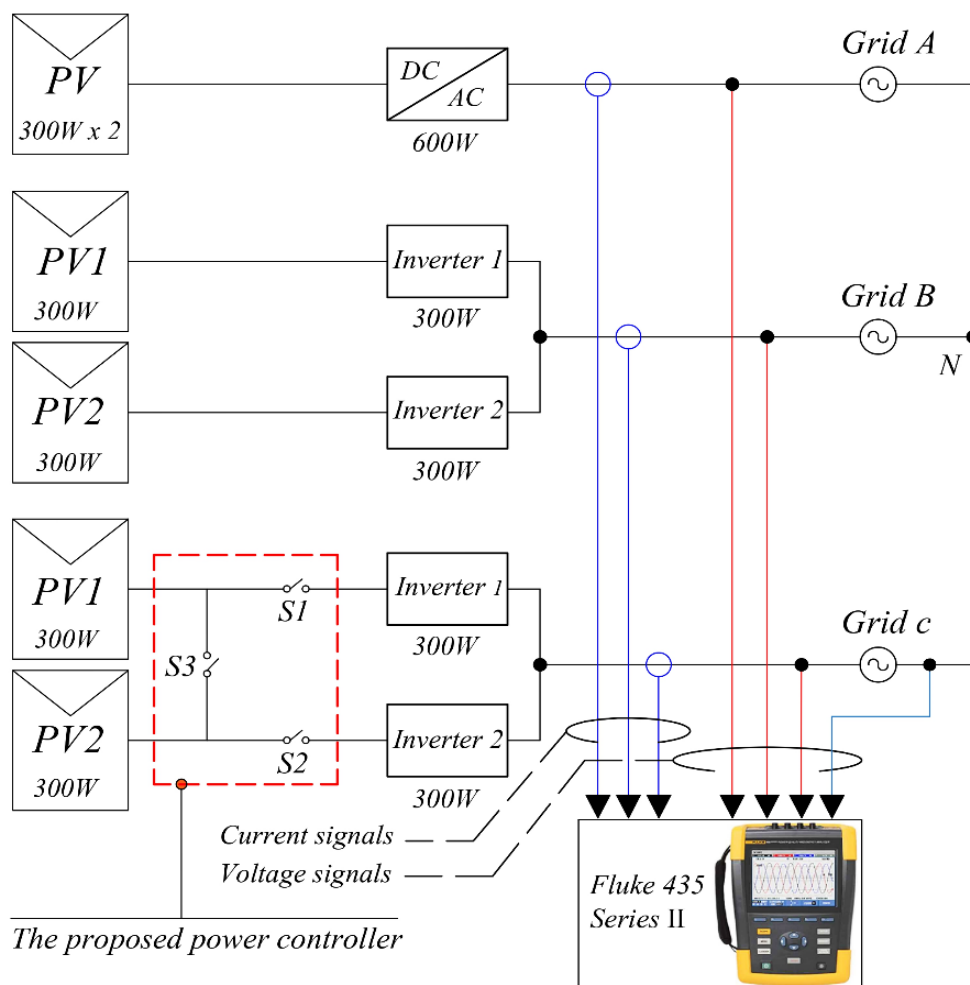


Figure 12 Voltage and current measurement in each case by Fluke 435 series II.

Table 4 Characteristics of solar cell panels with JINKO (JKM335PP-72).

parameters	symbols	min.	normal	unit	condition
open circuit voltage	Voc	-	47.2	V	
max. power voltage	Vpm	-	38	V	irradiation
short circuit current	Isc	-	9.18	A	1000W/m ²
max. power current	Ipm	-	8.82	A	with Temp.
maximum power	Pm	250	335	W	25 °C
efficiency	η_m	-	17.26	%	

Table 5 Characteristics of grid-connected inverters with A300 and A600 models.

parameters	A600	A300
input data (DC)		
operation voltage	18-50V	18-50V
max power	600W	300W
max current	33.3A	16.6A
MPPT-voltage range	24-40V	24-40V
output data (AC)		
rated grid voltage/frequency	230V/50Hz	230V/50Hz
normal voltage range	180-280V	180-280V
frequency range	47.5-52.5Hz	47.5-52.5Hz
max power	590W	295W
max current	3.27A	1.64A
power factor	0.99	0.99
efficiency	98%	98%
phase no.	single	single

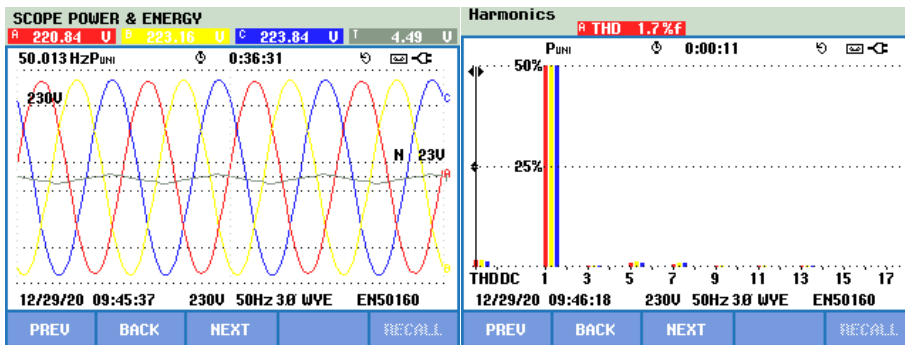
จาก (Table 5) แสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ทั้งสองขนาดจะมีคุณลักษณะเดียวกัน แตกต่างกันเฉพาะพิกัดกำลังไฟฟ้าและกระแสทางด้านออกและด้านเข้า และเมื่อนำไปเชื่อมโยงกับคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 38 โวลต์ จะเข้าเงื่อนไขแรงดันการทำงาน 18-50 โวลต์ และเป็นค่าที่อยู่ในย่านแรงดัน 24-40 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับการทำงานของ MPPT ที่สามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด ดังนั้นจึงใช้การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนานกัน

1. ผลการทดสอบฮาร์มอนิกในย่านความถี่สูงและต่ำ

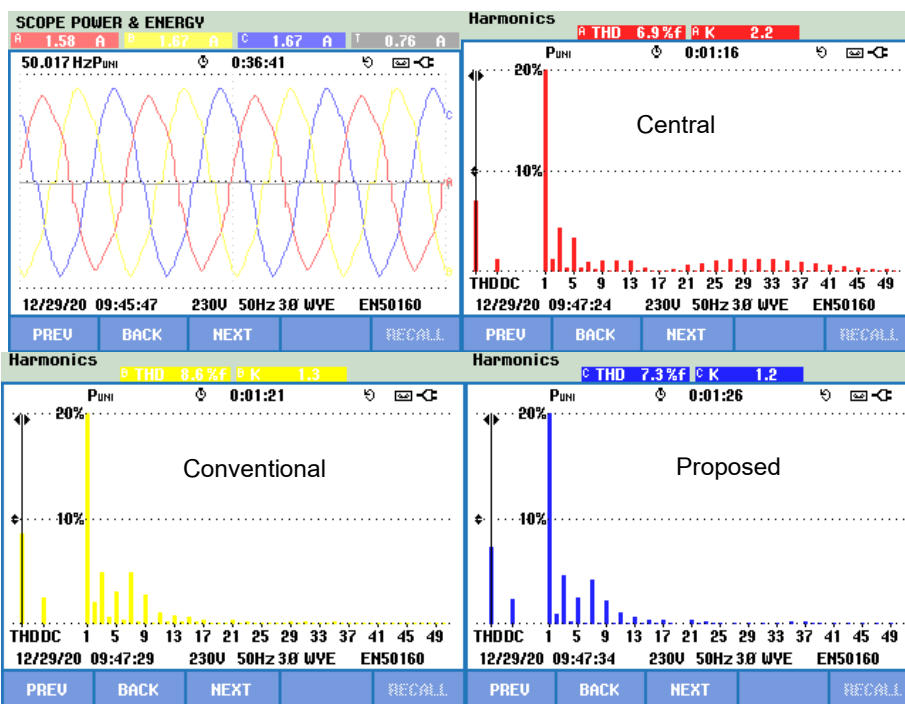
(Figure 13) แสดงแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าในช่วง

ความถี่สูง จาก (Figure 13a) จะเห็นว่าแรงดันระบบจะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์มาก ทำให้มีแรงดันฮาร์มอนิกเพียงเล็กน้อยสามารถละเลยได้ แรงดันระบบจึงมีเฉพาะความถี่หลักมูล ดังนั้นกำลังไฟฟ้าด้านออกจะมีเฉพาะความถี่หลักมูล P_1 สอดคล้องตามสมการที่ (9) และเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสพบว่ากระแสของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 กรณีสอดคล้องผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแส (THDi) จึงไม่แตกต่างกันมากอยู่ที่ประมาณ 6.90-8.60 เปอร์เซ็นต์ ดัง (Figure 13b) โดยอันดับกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละกรณีอันดับแรกจะเริ่มตั้งแต่อันดับ 3 และเป็นอันดับที่มีค่าสูงสุดเหมือนกันทั้ง 3 กรณี

(Figure 14) แสดงกระแสและสเปกตรัมในช่วงความถี่ต่ำ จากภาพจะเห็นได้ว่ากระแสในช่วงนี้สังเกตจาก (Figure 14a) จะมีความผิดเพี้ยนค่อนข้างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงจุดผ่านศูนย์ (zero crossing) นอกจากนั้นช่วงสูงสุดของกระแส (maximum current) ยังมีรอยบากในบางเฟส ส่งผลให้ค่า THDi สูงกว่าในช่วงความถี่สูง ดังแสดงสเปกตรัมใน (Figure 14b) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเปรียบเทียบกระแสของวิธีที่นำเสนอใน (Figure 14a) พบว่าจะมีความผิดเพี้ยนน้อยกว่าอีก 2 กรณี ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับของวิธีที่นำเสนอ (สี่ฟ้า) และ THDi มีค่าน้อยกว่าอีก 2 กรณี ดังแสดงการเปรียบเทียบใน (Figure 14b) และเมื่อนำไปเชื่อมโยงกับสมการ (6) จึงส่งผลให้ตัวประกอบกำลัง (PF) สูงกว่าอีก 2 กรณี

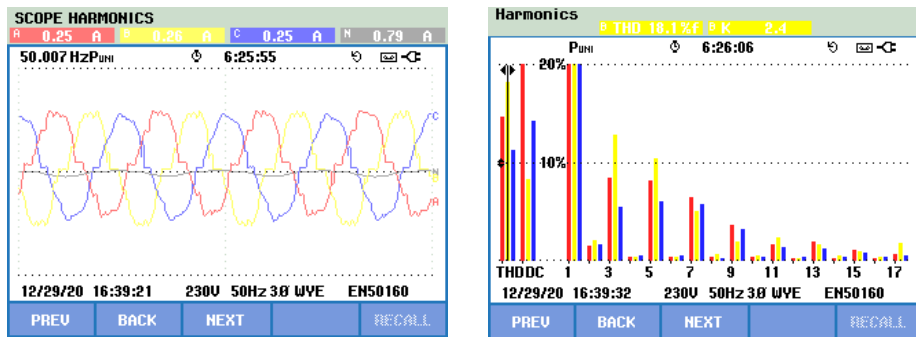


(a) Voltage and its spectrum in each case.



(b) Current and its spectrum in each case.

Figure 13 Experimental results of voltages, currents and their spectrum with high irradiation for a 600W inverter (red), conventional inverters with 300Wx2 (yellow) and proposed inverters with 300Wx2 (blue).



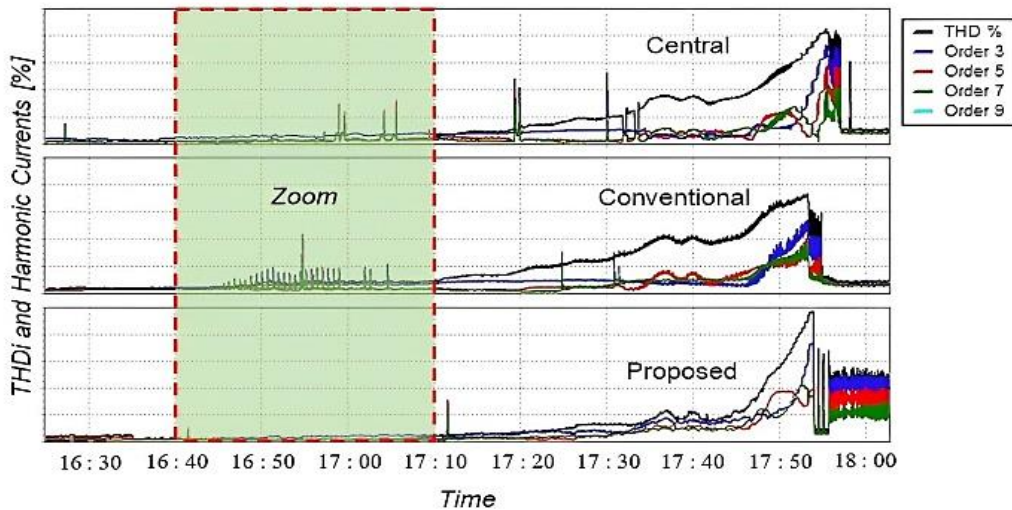
(a) Current waveforms.

(b) Spectrum of currents.

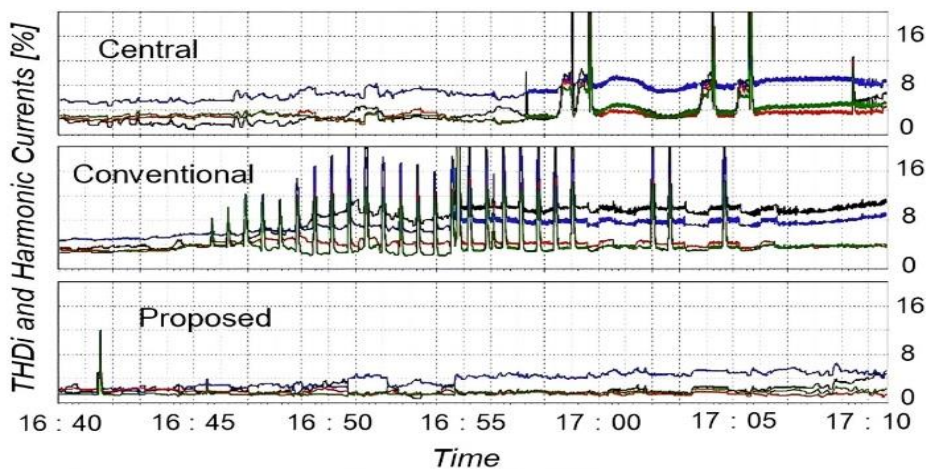
Figure 14 Experimental results of currents and their spectrum for a 600W inverter (red), conventional inverters with 300Wx2 (yellow) and proposed inverters with 300Wx2 (blue) during 4.39 PM-4.42 PM (low irradiation).

(Figure 15a) แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7, 9 และ THDi ของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 กรณี ตั้งแต่ช่วงเวลา 16.25-18.00 น. จากภาพแสดงให้เห็นว่า ทั้ง 3 กรณีมีแนวโน้มค่าร้อยละของกระแสฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากกระแสที่ความถี่หลักมูลจะลดลงตามการลดลงของความเข้มแสง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Watjanatepin, & Prakom (2012) และหากพิจารณากรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ 600 วัตต์ เพียงตัวเดียว และกรณีอินเวอร์เตอร์ 300 วัตต์ จำนวน 2 ตัว แบบดั้งเดิม พบว่าทั้งสองกรณีจะให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกใกล้เคียงกัน แต่สำหรับกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ 300 วัตต์ จำนวน 2 ตัว แบบที่เสนอที่ใช้การควบคุมในช่วงโวลต์น้อยให้เหลืออินเวอร์เตอร์ทำงานเพียงแค่ตัวเดียวโดยกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ในขณะนี้ จะเพิ่มขึ้นสองเท่า ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกลดลง ซึ่งจะสอดคล้องตามการวิเคราะห์ในงานวิจัยของ Du, Lu, James, & Comforth (2013) ที่ชี้ให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านออกและพิกัดมีค่าต่ำ (P_o/P_{rated}) จะมีผล

ให้แรงดันบัสไฟตรงมีการกระเพื่อม (DC link variation) และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการมอดูเลตเกิน (overmodulation) ความผิดเพี้ยนของกระแสด้านออกจึงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาในส่วนขยายสเกลเวลา (แรเงาด้วยสีเขียว) ใน (Figure 15b) พบว่าค่าร้อยละกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์แบบที่เสนอในแต่ละอันดับจะลดลงต่ำกว่าเกือบครึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 (สีฟ้า) ด้วยเหตุนี้จึงยืนยันได้ว่าแนวทางที่เสนอสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกได้ต่ำกว่าแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ (Table 1) พบว่าแม้อินเวอร์เตอร์จะไม่ได้ทำงานที่พิกัดแต่ค่าเปอร์เซ็นต์ THDi ยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวง นอกจากนั้นหากพิจารณากระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมจะมีลักษณะเป็นพัลส์ โดยเป็นพฤติกรรมเองของอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในย่านกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำซึ่งจะแตกต่างจากกรณีของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอกับที่ได้ควบคุมให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า



(a) A percentage of harmonic currents with 3rd (blue), 5th (red), 7th (green), 9th (light blue) and THDi (black).



(b) Time-expanded harmonic currents (zoomed) in (Figure 12a).

Figure 15 Experimental results of harmonic currents for a 600W inverter (top), conventional inverters with 300Wx2 (mid.) and proposed inverters with 300Wx2 (bottom) during 4.25 PM-6.00 PM (low irradiation).

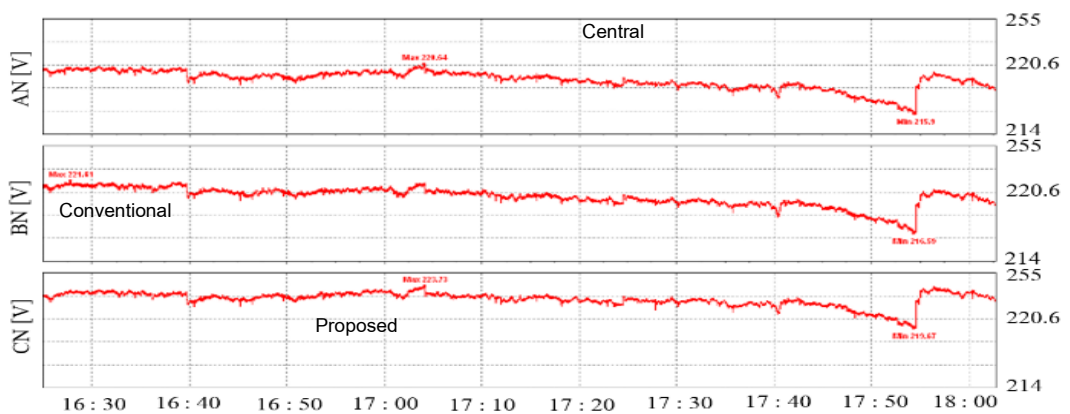
2. ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าและพลังงานในช่วงความเข้มแสงต่ำ

(Figure 16a) แสดงแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งชี้ให้เห็นว่าขนาดของแรงดันทั้ง 3 เฟส

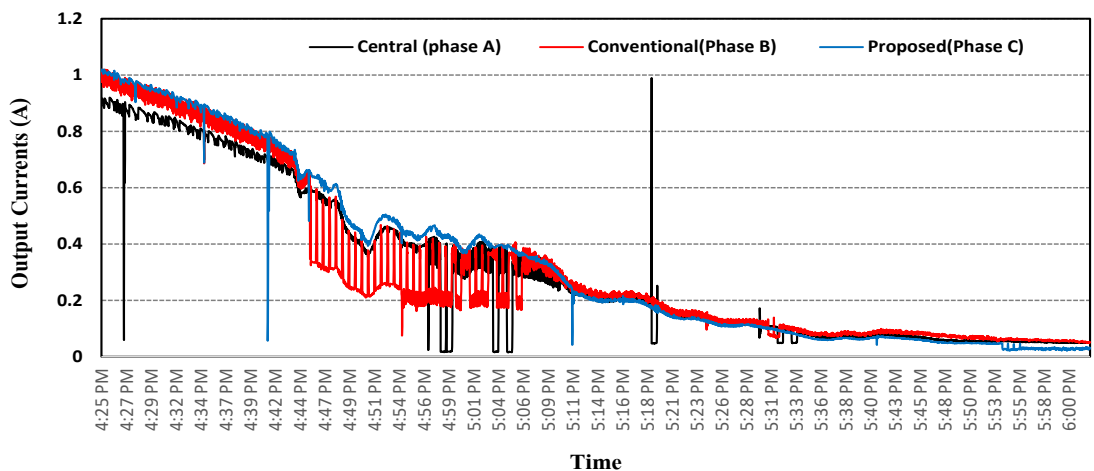
(3 กรณี) จะมีลักษณะรูปคลื่นเหมือนกัน ๆ กัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 215V-224 โวลต์ ส่วน (Figure 16b) และ (Figure 16c) แสดงกระแสและกำลังไฟฟ้าด้านออกตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่ากระแสและ

กำลังไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกันกล่าวคือ กระแสเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสลดลง กำลังไฟฟ้าก็ลดลงตาม เมื่อนำกำลังไฟฟ้าของวิธีที่ เสนอเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิม พบว่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตลอดช่วงเวลา 16.25-17.00 น. ซึ่งไม่ใช่ แค่เพียงช่วงเวลา 16.47-17.00 น. ที่กำลังไฟฟ้าของ แบบดั้งเดิมมีพัลส์เกิดขึ้นเท่านั้น การเพิ่มขึ้นของ

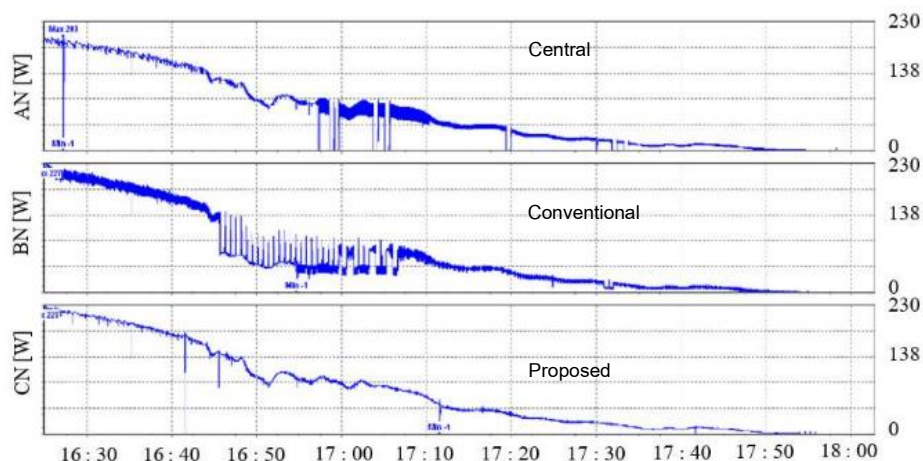
กำลังไฟฟ้าดังกล่าวมาจากผลของกระแสฮาร์มอนิก ที่ลดลงทำให้กระแสที่ความถี่หลักมูล I_1 เพิ่มขึ้น จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้กำลังไฟฟ้าจริงของวิธีที่ นำเสนอมากกว่าแบบดั้งเดิม สอดคล้องตามสมการที่ (9) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ได้พลังงานเพิ่มขึ้นดังแสดงใน (Figure 16d) และสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ ดัง (Table 6)



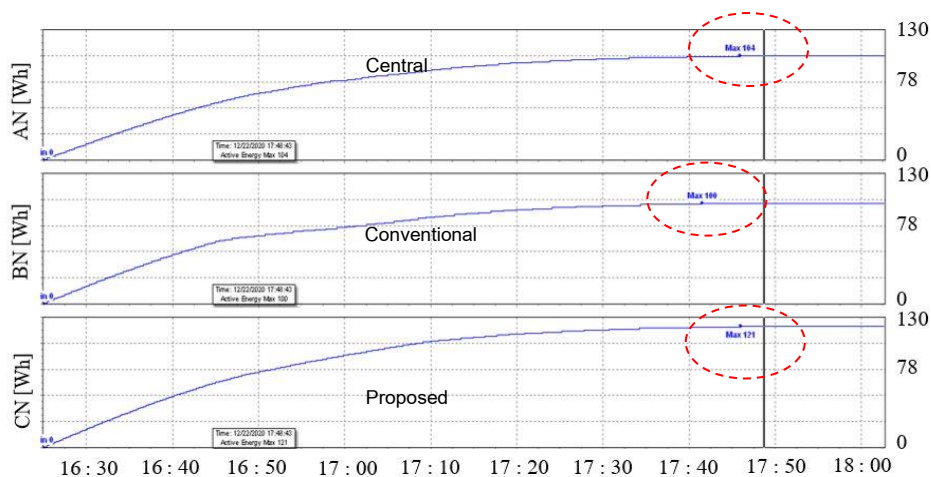
(a) Output voltages.



(b) Output currents.



(c) Output power.



(d) Output energies.

Figure 16 Experimental results of inverters with 600W (top), 300Wx2 conventional (mid.) and 300Wx2 proposed (bottom) during 4.25-6.00 PM (low irradiation).

Table 6 Comparison of experimental results in each case during 4.25 PM-6.00 PM (low irradiation).

PV system in each case	maximum power of PV (W_p)	average output power P_o (W)	time t (h)	energies E (Wh)
central	600	65.822	1.583	104
conventional	600	63.291	1.583	100
proposed	600	76.582	1.583	121

จาก (Table 6) จะเห็นได้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบศูนย์รวม แบบกระจายดั้งเดิม และแบบกระจายที่เสนอ จะให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออก 65.822, 63.291 และ 76.582 วัตต์ ตามลำดับ ตั้งแต่เวลา 16.25-18.00 น. หรือ 1.583 ชั่วโมง จะได้พลังงาน 104, 100 และ 121 วัตต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบดั้งเดิมประมาณ 13 วัตต์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (2016); Kuo, & Lu (2012) และมากกว่าแบบศูนย์รวมประมาณ 10.76 วัตต์ ดังนั้นเมื่อทดสอบที่เงื่อนไขเดียวกันและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ดังสมการ (10) ในช่วงโหลดน้อยที่ความเข้มแสงต่ำได้ และหากเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบดั้งเดิมประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่าแบบศูนย์รวมประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์

สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณภาพไฟฟ้าในช่วงโหลดน้อยจากความเข้มแสงต่ำของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย โดยอาศัยการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์อย่างง่ายที่ใช้แมคเนติกส์คอนแทคเตอร์ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ในบทความนี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์โดยอาศัยโปรแกรม PVsyst เพื่อนำมาใช้เป็นเงื่อนไขในการควบคุมตามช่วงเวลาอย่างเหมาะสมให้กับชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า

อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านออกและกำลังไฟฟ้าที่พิกัดของอินเวอร์เตอร์ที่ต่ำในช่วงความเข้มแสงน้อยจะให้กระแสฮาร์มอนิกที่สูงและมีผลให้ตัวประกอบกำลังลดต่ำลง แต่เมื่อใช้วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่เสนอสามารถเพิ่มอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกให้สูงขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกลดลงต่ำกว่าแบบดั้งเดิมจนเป็นผลให้ THDi ลดลงจาก 18.10 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 11.25 เปอร์เซ็นต์ และที่สำคัญเมื่ออินเวอร์เตอร์มีกำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากันแต่กำลังไฟฟ้าด้านออกของวิธีที่นำเสนอมีค่าสูงขึ้นจาก 63.291 วัตต์ เป็น 76.582 วัตต์ จึงยืนยันได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงกว่าแบบดั้งเดิมได้ การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในลักษณะดังกล่าวจึงทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 21 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่เสนอจะปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณภาพไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่ต้องการ แต่หากต้องการให้การควบคุมกำลังไฟฟ้ามีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าควรเปลี่ยนมาใช้เงื่อนไขกระแสในการควบคุมแทน นอกจากนั้นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้ายังสามารถเปลี่ยนมาใช้เป็นแบบไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออาร์ดิวโนซึ่งจะเป็นงานวิจัยที่สามารถขยายต่อไปในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- Alahmad, M., Chaaban, M. A., & Lau, S. K. (2011). An adaptive photovoltaic-inverter topology. *Innovative Smart Grid Technologies ISGT2011* (pp. 1-7). Anaheim, CA: IEEE.
- Du, Y., Lu, D. D. C., James, G., & Cornforth, D. J. (2013). Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions. *Solar Energy*, 94, 182-194.

- Fang, X., Yang, Q., & Yan, W. (2022). Power generation maximization of distributed photovoltaic systems using dynamic topology reconfiguration. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7, 35.
- Feeney, C., & Duffy, M. (2012). Comparison of light-load improvement techniques for low power buck converters. *47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1-6). Uxbridge: IEEE.
- Gonzalez, R., Lopez, J., Sanchis, P., & Marroyo, L. (2007). Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2), 693-697.
- Goud, P. C. D., & Gupta, R. (2016). Global MPPT of grid connected solar PV inverter under partially shaded condition. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (pp. 1-6). Trivandrum: IEEE.
- Hart, D. W. (2011). *Power electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Hu, H., Al-Hoor, W., Kutkut, N. H., Batarseh, I., & Shen, Z. J. (2010). Efficiency improvement of grid-tied inverters at low input power using pulse-skipping control strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(12), 3129-3138.
- Huang, W. H., Liao, S. H., Teng, J. H., Hsieh, T. Y., Lan, B. R., & Chiang, C. C. (2016). Intelligent control scheme for output efficiency improvement of parallel inverters. *IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)* (pp. 1-6). Okayama: IEEE.
- Jang, Y., Jovanovic, M. M., & Dillman, D. L. (2010). Light load efficiency optimization method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(1), 67-74.
- Ketjoy, N., Chamsa-ard, W., & Mensin, P. (2021). Analysis of factors affecting efficiency of inverters: Case study grid-connected PV systems in lower northern region of Thailand. *Energy Report*, 7, 3857-3868.
- Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., & Blaabjerg, F. (2005). A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1293-1306.
- Kuo, M. T., & Lu, S. D. (2012). A study of DC-AC inverter optimization for photovoltaic power generation system. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)* (pp. 1-7). Las Vegas, NV: IEEE.
- Lai, R. S., & Ngo, K. D. T. (1995). A PWM method for reduction of switching loss in a full-bridge inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 10(3), 326-332.
- Li, Q., Lee, F. C., Xu, M., & Wang, C. (2009). Light load efficiency improvement for PFC. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 3755-3760). San Jose, CA: IEEE.
- PVsyst. (2017). *Grid connected tutorial*. Retrieved 19 March 2023, from https://www.pvsyst.com/wp-content/uploads/2020/10/PVsyst_Tutorials_V7_Grid_Connected.pdf
- Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodriguez, P. (2011). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Watjanatepin, N., & Prakorn, S. (2012). Investigation of the power quality of the micro-grid connected inverter. *RMUTI Academic Journal*, 5(2), 75-87. (in Thai)
- Watjanatepin, N., & Boonmee, C. (2015). Testing of the efficiency of the module-grid inverter with three different types of PV Modules: In the operation of

Thailand. *RMUTSB Academic Journal*, 3(2), 137-147. (in Thai)

- Zhang, Y., Zhang, Z., & Yang, G. (2015). A novel control method for photovoltaic grid-connected micro-inverters to achieve high efficiency in light load. *9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)* (pp. 2826-2831). Seoul: IEEE.
- Zhang, Z., Chen, M., Gao, M., Mo, Q., & Qian, Z. (2011). An optimal control method for grid-connected photovoltaic micro-inverter to improve the efficiency at light-load condition. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 219-224). Phoenix, AZ: IEEE.