

การวิเคราะห์ความเสถียรของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟส

STABILITY ANALYSIS OF THREE-PHASE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

อนุชิต อุไรรัตน์¹, เฉลิม จินาทุน¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Anuchit Aurairat¹, Chalerm Jinatun¹

¹Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology_Rattanakosin

E-mail: anuchit.aur@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความเสถียรของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบขั้นตอนเดียวโดยการใช้อัลกอริทึมการเพิ่มความนำตรระยะคลุมเครือเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงร่วมกับโมเดลทำนายล่วงหน้าในการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์และควบคุมการเชื่อมต่อกับกริดเพื่อให้ระบบสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อการแผ่รังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด โดยที่ระบบสามารถควบคุมผลรวมความผิดพลาดอาร์โมนิคไม่ให้เกิดค่ามาตรฐาน รักษาตัวประกอบกำลังของระบบให้เท่ากับ 1 รวมถึงสามารถรักษาการเชื่อมต่อกับกริดได้ จากผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอสามารถรักษาตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ตลอดเวลา โดยที่ผลรวมความผิดพลาดฮามอนิกส์เท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการเข้าสู่จุดจ่ายกำลังสูงสุด 0.02 วินาที สามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อการฉายรังสีและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

คำสำคัญ: การเพิ่มความนำตรระยะคลุมเครือ โมเดลทำนายล่วงหน้า จุดจ่ายกำลังสูงสุด ความผิดพลาดฮามอนิกส์ ตัวประกอบกำลัง

Abstract

This research presents the stability analysis of a three-phase grid-connected photovoltaic system with a single-stage three-phase inverter by applying increment conductance algorithms-fuzzy logic to control reference current in conjunction with a model predictive control to control the maximum power point of the photovoltaic

panel. As well as to control the grid connection so that the system can track the maximum power point when the irradiation and temperature change suddenly. The system is able to control the total harmonic distortion within the standard value, keeping the system power factor to be equal to 1 and be able to maintain a connection to the grid. The simulation results show that the proposed system can maintain a power factor of 1 at all times with the total harmonic distortion equal to 2.5 %. The maximum power point tracking time is 0.02 seconds. The maximum power point can be tracked when the irradiation and the temperature changes suddenly.

Keywords: Increment conductance, Model predictive control, Maximum power point, Total harmonic distortion, Power factor

บทนำ

ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย(distributed power generation system : DPGS) ที่ใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ [1-3] เนื่องจากคุณสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยการอินเทอร์เฟซระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายกับกริดอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดจึงมีบทบาทสำคัญในการจ่ายพลังงานคุณภาพสูงเข้าไปในกริด ตลอดจนรับประกันการทำงานด้านความปลอดภัยและการรองรับโครงข่ายไฟฟ้า[4-5]

อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าหรือควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการจ่ายกระแสไปยังกริดเนื่องจากการตอบสนองแบบไดนามิกและความสามารถในการป้องกันการรบกวนที่ดี สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดที่ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่เน้นที่กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้างริงและกำลังไฟฟ้าต้านกลับ โดยจะสร้างรูปคลื่นของมอดูเลตโดยตรงสำหรับมอดูเลเตอร์ความกว้างพัลส์ [6] (sine pulse width modulation : SPWM) ซึ่งสร้างสัญญาณขับของสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด

อย่างไรก็ตามการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ในเชิงพาณิชย์ต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่จึงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและพื้นที่เกษตรกรรม ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการปรับปรุงระบบติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking : MPPT)[7-10] เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อการแผ่รังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหรืออาจเกิดจากแผงถูกบังบางส่วน[11-12] การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดมีหลายวิธีเช่น การรบกวนและการสังเกต (perturbation and observation : P&O)[13-14] การเพิ่มความนำ (incremental conductance : INC)[15-16] ตรรกะคลุมเครือ (fuzzy logic control : FLC)[17] การปีนเขา (hill climbing) การเพิ่มประสิทธิภาพของฝูงอนุภาค (particle swarm optimization : PSO)[18-19] โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network : ANN) รวมถึงแบบผสม (HYBRID) เช่นระบบอนุกรมประสาทคลุมเครือที่ปรับตัวได้ (hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system : ANFIS) การรบกวนและการสังเกต

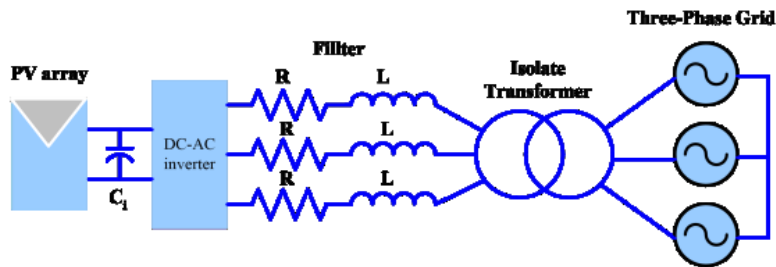
การป้อนเข้าและการเพิ่มความนำเป็นวิธีติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดแบบคลาสสิก การใช้ฮาร์ดแวร์ของวิธีการรบกวนและการสังเกตและการป้อนเข้านั้นง่ายกว่า แต่ประกอบด้วยความผันผวนสูงใกล้กับจุดจ่ายพลังงานสูงสุด[21-23] ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน วิธีเพิ่มความนำนั้นแม่นยำและยืดหยุ่นได้ภายใต้สถานการณ์บรรยากาศที่ผันผวน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ประกอบด้วย การจองและความซับซ้อนในการทดลอง อย่างไรก็ตาม อัลกอริธึมที่กล่าวถึงข้างต้นไม่มีประสิทธิภาพภายใต้การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคการควบคุมแบบคร่อมและโครงข่ายประสาทเทียมเป็นตัวติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของอัลกอริธึม แบบคลาสสิกภายใต้สภาพอากาศที่ผัน วิธีแบบคร่อมมีสถาปัตยกรรมที่เรียบง่ายกว่าและการออกแบบที่แข็งแกร่ง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาความไม่แน่นอนและปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ วิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยเซลล์ประสาทหลายชั้นนั้นใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามการใช้วิธีนี้จำเป็นต้องมีข้อมูลขนาดใหญ่สำหรับการฝึกอบรมที่เหมาะสมเป็นระยะๆ เพื่อให้ได้จุดจ่ายกำลังสูงสุดที่ อย่างไรก็ตามข้อเสียของตัวควบคุมนี้ก็คือความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์สูง

เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์(photovoltaic : PV) จ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยจุดพลังงานสูงสุดจะต้องเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC/DC) หรือวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสสลับ(DC/AC) โดยใช้อัลกอริธึมดังกล่าวมาแล้วทั้งหมดในการติดตามและควบคุมจุดพลังงานสูงสุด ส่วนอื่นๆของระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมและเซ็นเซอร์ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าไปยังกริด ฟังก์ชันพื้นฐานทั้งหมดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเช่น ผลรวมความถี่ของฮาร์โมนิก (THD) การแปรผันของแรงดันไฟฟ้าของกริด การติดตามจุดกำลังสูงสุด(MPPT) การตรวจจับการแรงบางบางส่วน การควบคุมตัวประกอบกำลัง การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่รวดเร็ว และการตรวจจับความถี่ที่รวดเร็ว โดยที่ผลรวมความถี่ของฮาร์โมนิกถูกจำกัดโดยมาตรฐาน การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดต้องมีประสิทธิภาพสูงมากในสภาวะคงตัว การติดตามอย่างรวดเร็วระหว่างการเปลี่ยนแปลงการฉายรังสีอย่างรวดเร็วและการทำงานที่เสถียรที่ระดับการฉายรังสีที่ต่ำมาก

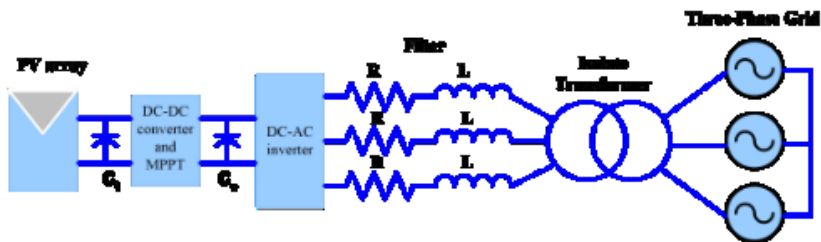
ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักๆ คือระบบสแตนด์ออลและระบบเชื่อมต่อกับกริด ระบบแบบสแตนด์ออลมักใช้ในระบบพลังงานต่ำ เช่นการใช้งานในที่พักอาศัยต้องมีแบตเตอรี่เพื่อเก็บพลังงานที่ผลิตโดยเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้ในตอนกลางคืนรวมถึงช่วงที่ระดับของแสงอาทิตย์มีค่าต่ำ ระบบที่เชื่อมต่อกับกริดเหมาะอย่างยิ่งสำหรับการผลิตพลังงานที่ดึงมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังกริดให้ได้มากที่สุดแม้ว่าอุณหภูมิและระดับการแผ่รังสีจะเปลี่ยนแปลง อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดแบ่งออกเป็นขั้นตอนเดียว (single state) และสองขั้นตอน (two state) [24] ระบบขั้นตอนเดียวเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างด้านเซลล์แสงอาทิตย์และด้านอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบสองขั้นตอนต้องใช้ตัวแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC) เพื่อเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับด้านอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2 อีกส่วนที่สำคัญคือการควบคุมการฉีดกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดซึ่งมีหลายวิธีเช่น ตัวควบคุมสัดส่วนอินทิกรัล (PI) ตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์ (PR)[25-26] การควบคุมกระแสไฟแบบสัดส่วนอินทิกรัลที่ใช้ในเฟรม

ซึ่งโครนัสมักใช้กับอินเวอร์เตอร์สามเฟส ในตัวแปลงแบบเฟสเดียวความสามารถของคอนโทรลเลอร์แบบสัดส่วนอินทิกรัลในการติดตามสัญญาณอ้างอิงจากกริดนั้นถูกจำกัด ในขณะที่ตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกวิธีการหนึ่งก็คืออัลกอริทึมแบบจำลองการทำนายล่วงหน้า (model predictive control : MPC) ซึ่งมีข้อดีคือง่ายไม่ซับซ้อน การคำนวณที่รวดเร็ว[27] ปัจจุบันใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนของระบบควบคุมรวมถึงฮาร์ดแวร์งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมกระแสอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์เพื่อฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กริดด้วยการพัฒนาอัลกอริทึมการเพิ่มความนำตรรกะคลุมเครือ ร่วมกับแบบจำลองการทำนายล่วงหน้า (modifier increment conductance fuzzy logic con troll-model predictive control: MINCFLC-MPC) เพื่อควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบขั้นตอนเดียวในการเชื่อมต่อกับกริด



ภาพที่ 1 กริดอินเวอร์เตอร์ชนิดขั้นตอนเดียว



ภาพที่ 2 กริดอินเวอร์เตอร์ชนิดสองขั้นตอน

ตารางที่ 1 การทบทวนวรรณกรรม

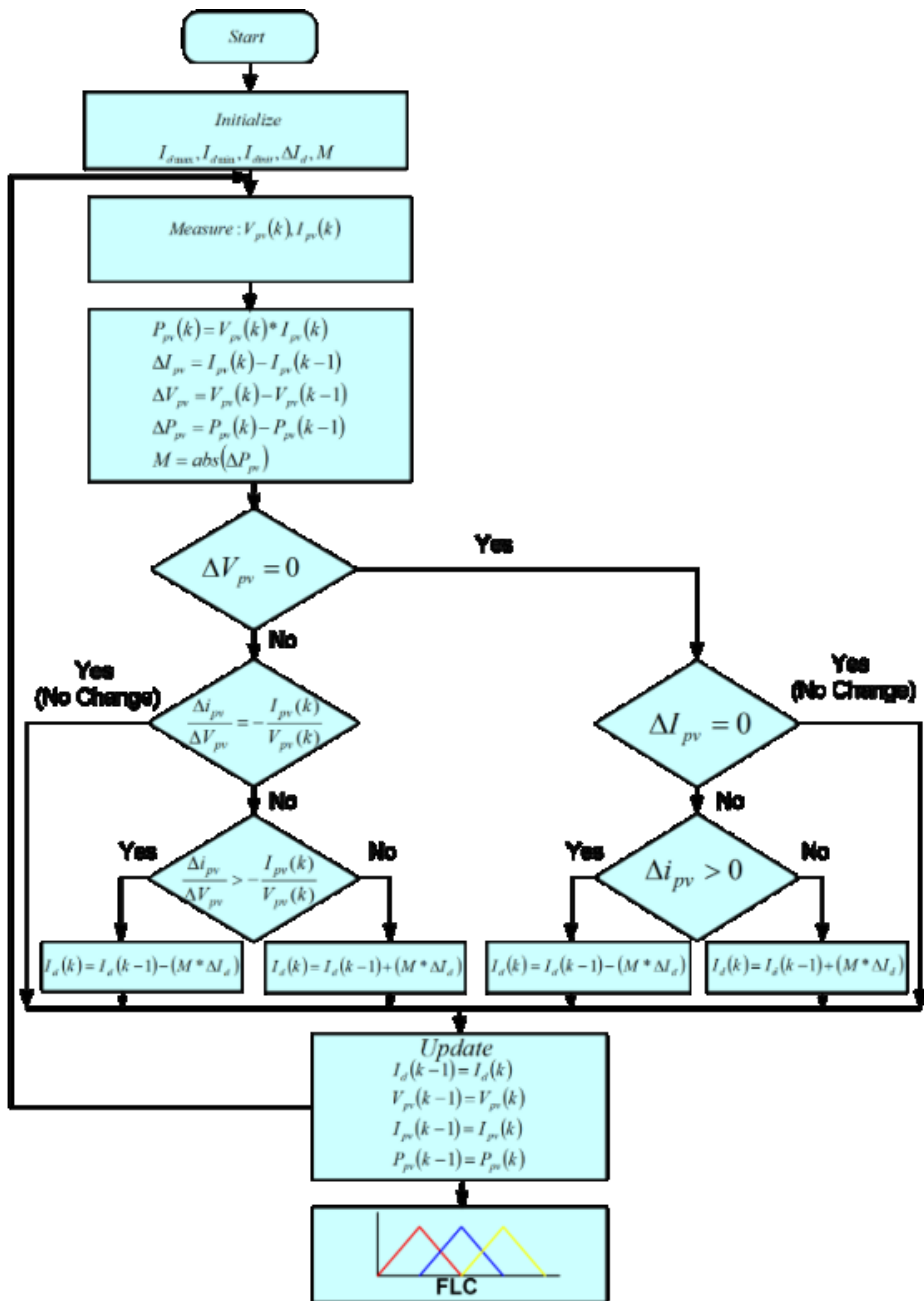
เรื่อง	อัลกอริทึม	ผลลัพธ์
An Enhanced Model Predictive Control Using Virtual Space Vectors for Grid-Connected Three-Level Neutral-Point Clamped Inverters[28]	Model Predictive control (MPC)	ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้รวดเร็วเมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลง
Nonlinear control and stability analysis of single stage grid-	Voltage control base on P&O (VP&O) and	ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลงและลด

เรื่อง	อัลกอริทึม	ผลลัพธ์
connected photovoltaic systems[29]	PI grid-connected inverter	การสูญเสียในวงจรแปลงผัน
Whale inspired algorithm based MPPT controllers for grid-connected solar photovoltaic system[30]	Whale optimization algorithm (WOA)	ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เมื่อแสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด
Implementation of a novel hybrid BAT-Fuzzy controller based MPPT for grid-connected PV-battery system[31]	fuzzy controller and BAT algorithm (BA)	ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้รวดเร็วเมื่อแสงและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

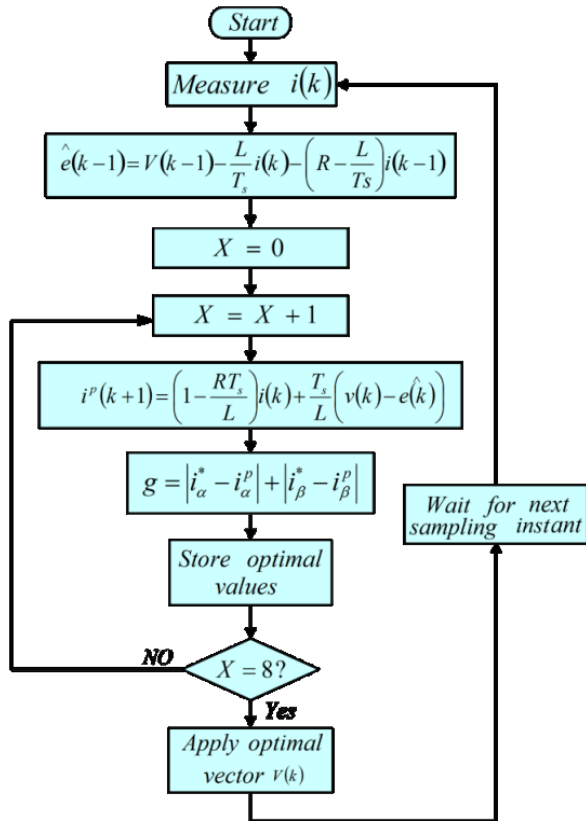
จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีวัตถุประสงค์คือสามารถติดตามจุดจ่ายจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็วเมื่อแสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วลดการสูญเสียในวงจรแปลงผันลดความผิดเพี้ยนของผลรวมฮาร์มอนิกส์และรักษาตัวประกอบกำลังให้เท่ากับ 1 จึงนำมาสู่การพัฒนาาระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสด้วยวงจรแปลงผันแบบขั้นตอนเดียว

วิธีดำเนินการวิจัย

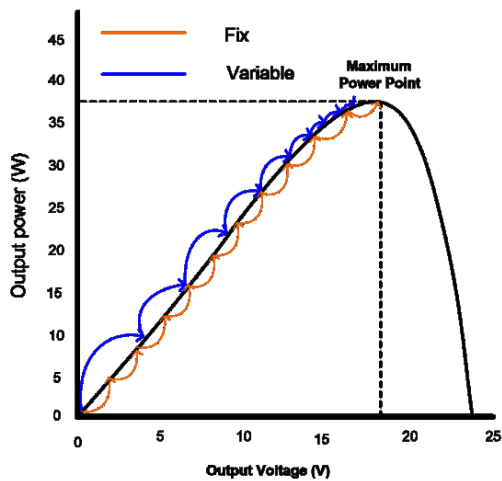
ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสด้วยวงจรแปลงผันแบบขั้นตอนเดียวประกอบด้วยอัลกอริทึมสองอัลกอริทึมการเพิ่มความนำตรรกะคลุมเครือเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงให้อยู่ในตำแหน่งจุดจ่ายกำลังสูงสุดดังแสดงในภาพที่ 3 และโมเดลทำนายล่วงหน้าเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 3 ไดอะแกรมวิธีการเพิ่มความนำตรรกะคลุมเครือ



ภาพที่ 4 โมเดลการทำนายล่วงหน้า



ภาพที่ 5 การปรับกระแสอ้างอิงด้วยอัลกอริธึมการเพิ่มความนำ

การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด

วิธีนี้ทำได้โดยการตรวจจับแรงดันและกระแสเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังเทียบกับแรงดันจากสมการที่ 1

$$dP/dV = I/V + dI/dV \tag{1}$$

โดยที่ I/V คือค่าความนำของเซลล์แสงอาทิตย์

dI/dV คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความนำ

หากมีค่าเป็นบวกแสดงว่าระบบทำงานด้านซ้ายของจุดจ่ายกำลังสูงสุดตัวระบบก็จะปรับแรงดันเพิ่มขึ้น แต่ถ้าผลเป็นลบแสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านขวาของจุดจ่ายกำลังสูงสุดระบบก็จะปรับแรงดันลดลง แต่ถ้าผลรวมเท่ากับศูนย์แสดงว่าระบบทำงานที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ระบบก็จะคงยังขั้วสวิตซ์ที่ให้แรงดันเดิมไว้ เพื่อเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดจึงปรับปรุงวิธีการเดิมซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกระแสสังการคงที่เป็นกระแสสังการแบบปรับเปลี่ยนตามอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 5 ด้วยการคูณกระแสสังการตั้งสมการที่ 2

$$M = abs(\Delta P_{pv}) \tag{2}$$

เพื่อลดการแกว่งบริเวณรอบๆจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดจึงเพิ่มตรรกะคลุมเครือด้วยกฎดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตรรกะคลุมเครือ

dErr Err	N	Z	P
N	Z	Z	Z
Z	Z	Z	S
P	S	M	L

โดยที่ N คือ ทิศทางลบ Z คือ ศูนย์ P คือ ทิศทางบวก S คือ น้อยที่สุด M คือ ปานกลาง L คือ มากที่สุด

การควบคุมการเชื่อมต่อกับกริด

การควบคุมการเชื่อมต่อกับกริดใช้อัลกอริทึมทำนายกระแสล่งหน้าเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้าไปในระบบกริด เทคนิคการควบคุมสามารถสรุปได้ดังนี้

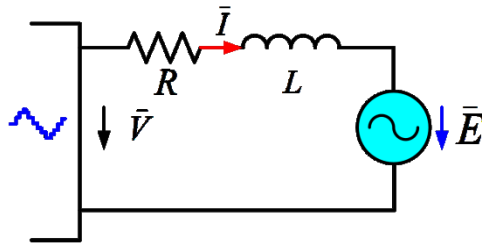
1. ตั้งค่าฟังก์ชันต้นทุนสมการ
2. สร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์และการออกแบบสวิตซ์ของอุปกรณ์สวิตซ์
3. สร้างแบบจำลองสำหรับการทำนาย

วัตถุประสงค์ของโมเดลการทำนายล่งหน้า คือการจำกัดข้อผิดพลาดระหว่างกระแสที่วัดได้กับกระแสอ้างอิง ฟังก์ชันต้นทุนสามารถเขียนได้ในรูปของแกนตั้งฉาก การวัดค่าความผิดพลาดระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่วัดได้แสดงไว้ในสมการที่ 3

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}^p(k+1)| \tag{3}$$

- เมื่อ $i_\alpha^*(k+1)$ เป็นส่วนจริง
- $i_\beta^p(k+1)$ เป็นส่วนจินตภาพ
- $i_\alpha^*(k+1)$ เป็นส่วนจริงของกระแสอ้างอิง
- $i_\beta^*(k+1)$ เป็นส่วนจินตภาพของกระแสอ้างอิง

หลักการทำนายกระแสของอินเวอร์เตอร์สามารถกำหนดได้โดยแรงดันตกคร่อม และแรงดันกริดดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 วงจรสมมูลของกริดอินเวอร์เตอร์

ตัวทำนายกระแสโพลในแบบจำลองที่ไม่ต่อเนื่องของแบบจำลองสามารถอธิบายได้เป็นสมการที่ 4

$$v = Ri + L di/dt + e \tag{4}$$

สมการ 4 สามารถแสดงด้วยฟังก์ชันการประมาณเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง T_s คือเวลาสุ่มตัวอย่าง แสดงในสมการที่ 5

$$d_i/d_t \approx i(k+1) - i(k)/T_s \tag{5}$$

แทนสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 4 ได้สมการที่ 6

$$v_k = Ri(k) + L \cdot i(k+1) - i(k)/T_s + e(k) \tag{6}$$

จากสมการที่ 6 ได้สมการที่ 7 ซึ่งเป็นสมการทำนายกระแสล่วงหน้า

$$i(k+1) = (T_s/L)(V(k) - e(k)) + i(k)(1 - RT_s/L) \tag{7}$$

สมการที่ 7 ใช้ในการทำนายกระแสโพลที่จะเกิดขึ้นในลำดับถัดไปโดยเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิง $i^*(k)$ ของระบบ

ในการวิเคราะห์แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส เป็นวิธีการที่ซับซ้อนซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของ 3 เฟส 2 ระดับ โมดูลอินเวอร์เตอร์แสดงโดยสถานะของสวิตช์สองสถานะเปิดและปิด ($S_{i1}, S_{i2} : i = a, b, c$) เมื่อ a, b, c คือแรงดันเฟส ระบบสามเฟสสามารถใช้กำหนดสัญญาณขับเกตโดยสมการที่ 8

$$S = 2/3(S_a + aS_b + a^2S_c) \tag{8}$$

ในการสร้างสัญญาณเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์สามเฟสจากสัญญาณควบคุม S_a , S_b และ S_c จะเห็นได้ว่าการแปลงแรงดันไฟกระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายสามารถสรุปได้เป็นสมการแรงดันไฟฟ้า 9 และสถานะของสัญญาณขั้วเกทแสดงในตารางที่ 3

$$V_s = \sqrt{2/3}V_{dc} (S_a + S_b e^{(j2\pi/3)} + S_c e^{(j4\pi/3)}) \quad (9)$$

ระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานดังแสดงในภาพที่ 7 ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์อินเวอร์เตอร์สามเฟส กริดสามเฟส ชุดควบคุมและเซ็นเซอร์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง

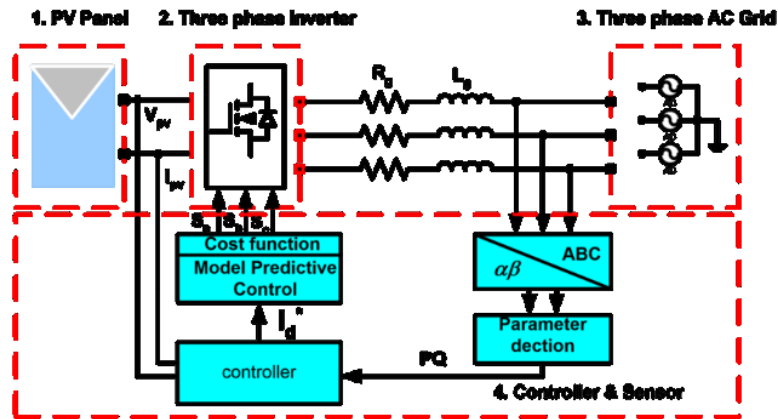
เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอสเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SPR-315E-WHT-D PV ถูกใช้ในการจำลองนี้ โดยโมดูลต่อแบบอนุกรมสิบเอ็ดชุดและสตริงต่อขนานสองชุด พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 สัญญาณขั้วเกทและแรงดันเอาต์พุต

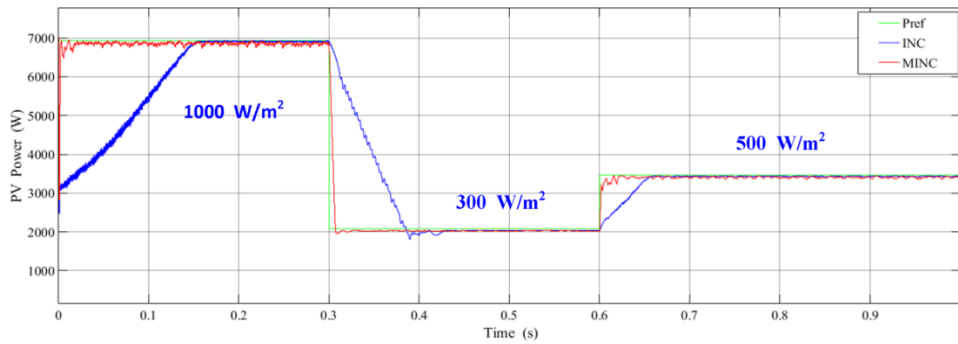
Vector	Output voltage equation	Gate drive		
		S_a	S_b	S_c
0	0	0	0	0
1	$(2/3)*V_{dc}$	1	0	0
2	$((1/3)*V_{dc})+(j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$	1	1	0
3	$((-1/3)*V_{dc})+(j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$	0	1	0
5	$((1/3)*V_{dc})-(j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$	0	0	1
6	$((-1/3)*V_{dc})-(j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$	1	0	1
7	0	1	1	1

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

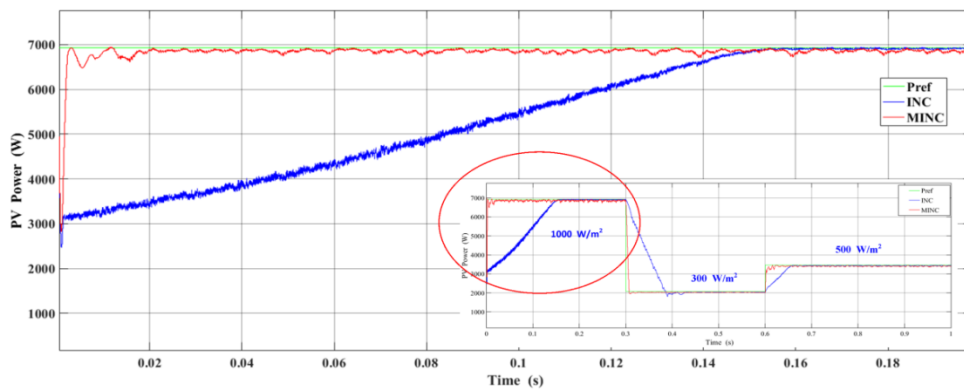
พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	315.072	วัตต์
จำนวนแผงที่ต่ออนุกรม	11	แผง
จำนวนสตริงที่ต่อขนาน	2	สตริง
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร	64.6	โวลต์
แรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายกำลังสูงสุด	54.7	โวลต์
กระแสลัดวงจร	6.14	แอมแปร์
กระแสไฟฟ้าขณะจ่ายกำลังสูงสุด	5.76	แอมแปร์
ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันขณะเปิดวงจร	-0.27269	-
ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสขณะลัดวงจร	0.061694	-



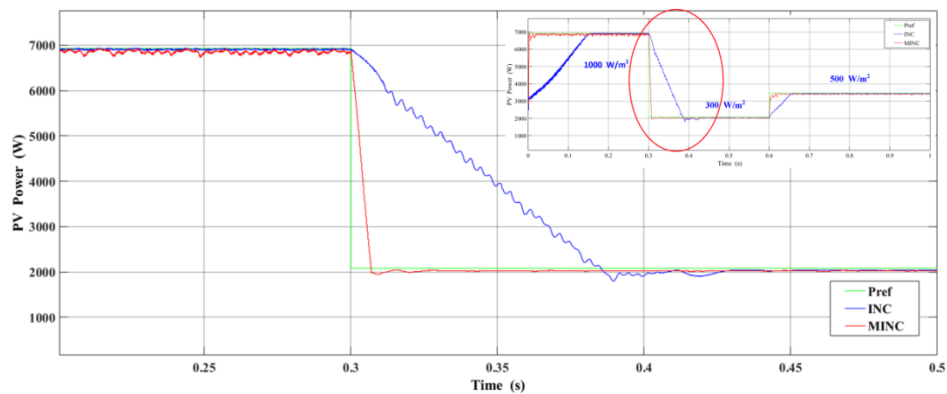
ภาพที่ 7 ผังรวมของระบบ



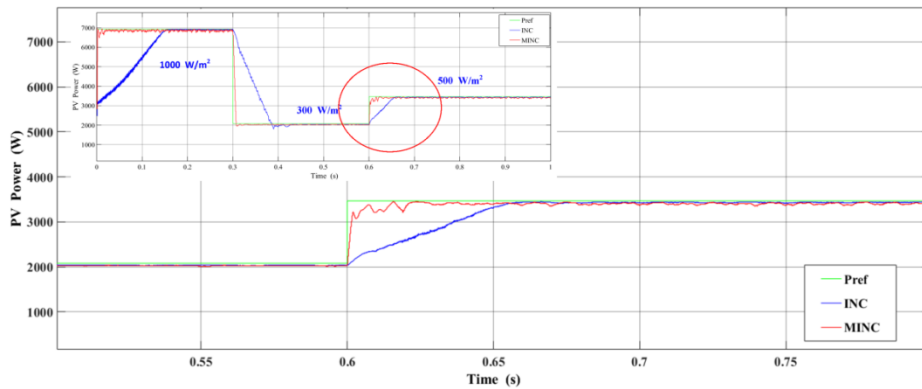
ภาพที่ 8 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด



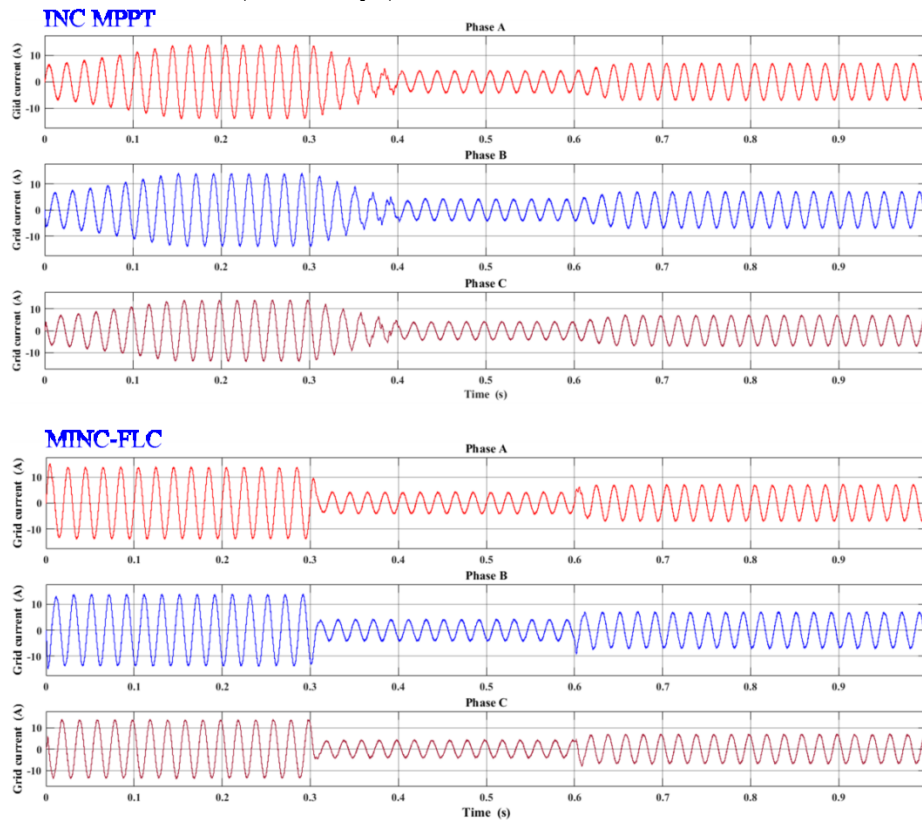
ภาพที่ 9 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อแสงเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ 10 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อแสงลดลงจาก 1,000 เป็น 300 วัตต์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ 11 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อแสงเพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 500 วัตต์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบรูปร่างของกระแสกริด

ผลการทดลองและอภิปรายผล

เพื่อทดสอบสมรรถนะ

ของระบบ แบ่งการทดสอบเป็นสองส่วนคือ เมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดที่อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส และแสงคงที่ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

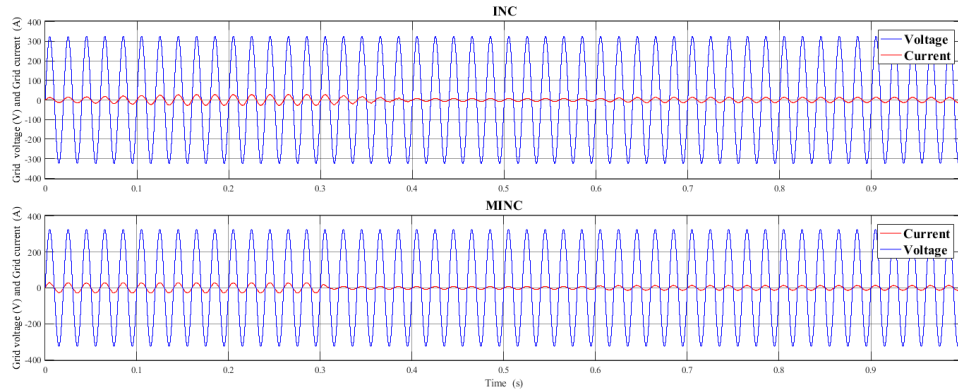
แสงเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

การทดสอบนี้

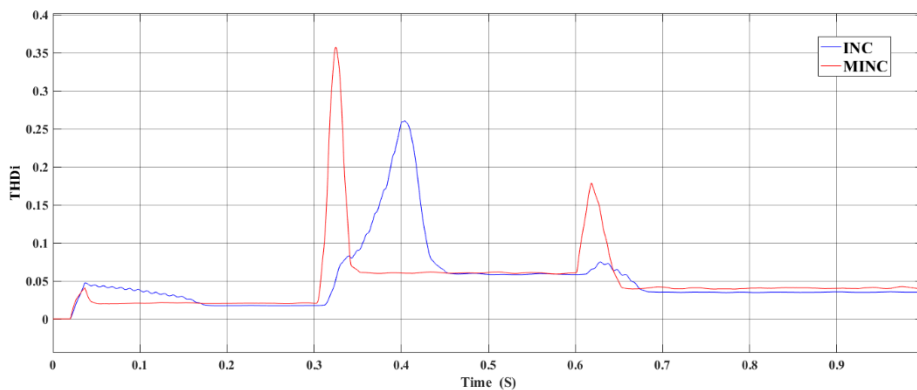
กำหนดให้แสงมีการเปลี่ยนแปลง 1,000 300 และ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร ผลการจำลองดังแสดงดังรูปที่ 8 ถึง 14 ตามลำดับ ภาพที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อแสงเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จากภาพจะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอ นั้นสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เร็วกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม ภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นเมื่อแสงเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร วิธีการที่นำเสนอติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดโดยใช้เวลา 0.02 วินาที ในขณะที่วิธีการแบบ

ดั้งเดิมใช้เวลา 0.16 วินาที เมื่อพิจารณาภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าเมื่อแสงลดลงเป็น 300 วัตต์ต่อตารางเมตร วิธีการที่นำเสนอ ยังคงสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้โดยมีความเร็วสูงกว่าวิธีการดั้งเดิม เมื่อแสงเพิ่มขึ้นเป็น 500 วัตต์ต่อตารางเมตร ทันทีทันใดดังภาพที่ 11 วิธีการที่นำเสนอนั้นยังคงติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้ดีกว่าวิธีการดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบรูปร่างของกระแสกริดดังภาพที่ 12 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอนั้น สามารถฉีดกระแสเข้าสู่กริดที่กระแสสูงสุดได้รวดเร็วกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมมากกว่ารวมถึงรูปคลื่นไม่ผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นชานัน



ภาพที่ 13 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากริด

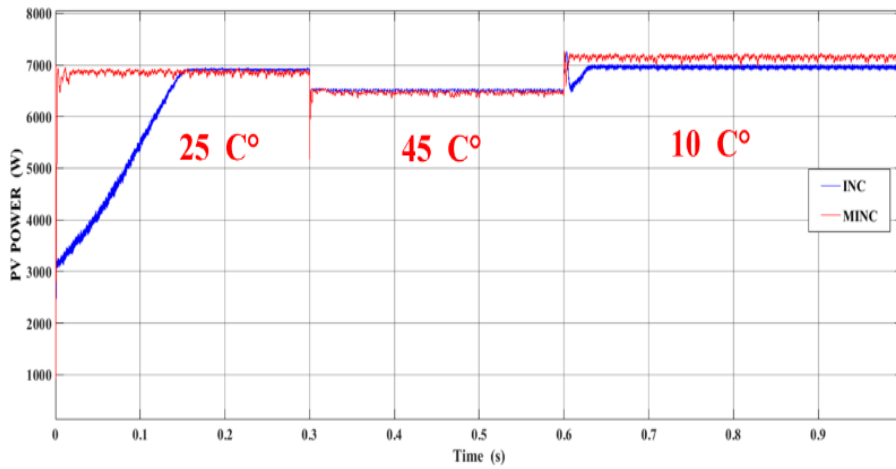


ภาพที่ 14 ผลรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์เมื่อแสงเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

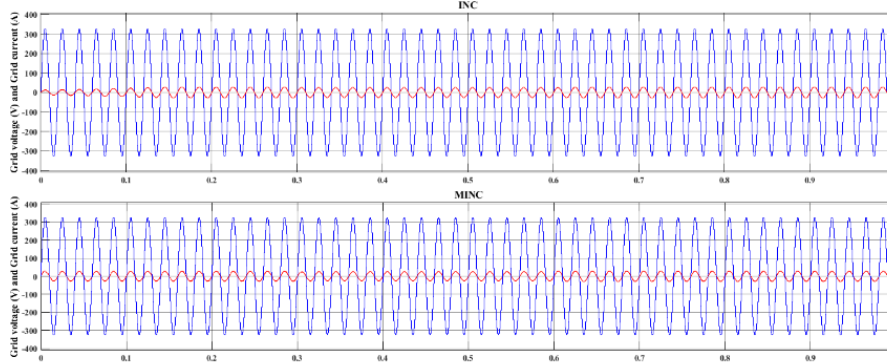
ภาพที่ 13 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของการฉีดกระแสเข้าสู่กริดด้วยวิธีการทำนายล่วงหน้าที่สามารถควบคุมตัวประกอบกำลังให้เท่ากับ 1 ตลอดเวลาเมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ภาพที่ 14 แสดงให้เห็นถึงผลรวมของความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแสซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์

อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

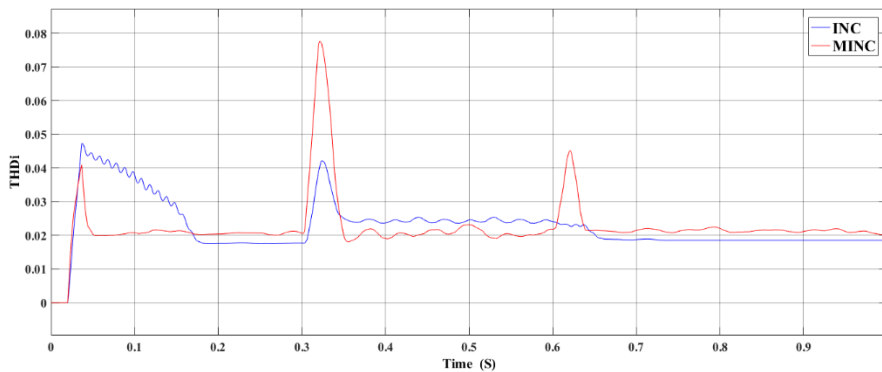
การทดสอบสมรรถนะของระบบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดที่ 25 45 และ 10 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อตรวจสอบผลของการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด รูปร่างของกระแสกริดและผลรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้า ผลการจำลองดังแสดงในภาพที่ 15-17



ภาพที่ 15 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 16 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากริดเมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 17 ผลรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

ภาพที่ 15 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดซึ่งสังเกตได้จากขณะที่อุณหภูมิลดจาก 45 เป็น 10 องศาเซลเซียส นั้นวิธีการแบบดั้งเดิมไม่สามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้

ภาพที่ 16 แสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมการจ่ายกระแสสู่กริดด้วยวิธีการทำนายล่วงหน้าสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังให้เท่ากับ 1 ตลอดเวลาแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ภาพที่ 17 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบที่สามารถรักษาผลรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์เฉลี่ยอยู่ที่ไม่เกิน 2.5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดขั้นตอนเดียว โดยพัฒนาวิธีการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มความนำแบบไม่คงที่ร่วมกับวิธีการตรรกะคลุมเครือ การฉีดกระแสเข้าสู่กริดใช้วิธีการทำนายล่วงหน้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความเร็วในการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเร็วขึ้น ลดความสูญเสียในวงจรแปลงผันควบคุมตัวประกอบกำลังได้ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ต่ำ โดยจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์ แบ่งการจำลองออกเป็นสองส่วนคือ เมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลงโดยอุณหภูมิคงที่และเมื่อแสงคงที่ อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดโดยใช้เวลา 0.02 วินาที ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ให้การสนับสนุนซอฟต์แวร์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink ตลอดจนสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- H. J. El-Khozondar, R. J. El-Khozondar, K. Matter, and T. Suntio (2016). A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms: Renewables Wind Water and Solar, 3(1).
- M. N. Bhukya and V. R. Kota (2019). A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions: Engineering Science and Technology an International Journal, 22(3), 869-884.
- V. Jatily, B. Azzopardi, J. Joshi, B. Venkateswaran V, A. Sharma, and S. Arora (2021). Experimental Analysis of hill-climbing MPPT algorithms under low irradiance levels: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, 111467.
- L. Jia, X. Ruan, W. Zhao, Z. Lin, and X. Wang (2018). An Adaptive Active Damper for Improving the Stability of Grid-Connected Inverters Under Weak Grid: IEEE Transactions on Power Electronics, 33(11), 9561-9574.
- A. M. A. Haidar and N. Julai (2019). An improved scheme for enhancing the ride-through capability of grid-connected photovoltaic systems towards meeting the recent grid codes requirements: Energy for Sustainable Development, 50, 38-49.
- N. S. Ahmad, T.-W. Tsai, and Y.-M. Chen (2020). Single-Phase Grid-Connected Inverters With Simplified SPWM Control: IEEE Open Journal of Power Electronics, 1, 170-179.
- J. Ahmed and Z. Salam (2018). An Enhanced Adaptive P&O MPPT for Fast and Efficient Tracking Under Varying Environmental Conditions: IEEE Transactions on Sustainable Energy, 9(3), 1487-1496.
- M. A. Abdullah, T. Al-Hadhrani, C. W. Tan, and A. H. Yatim (2018). Towards Green Energy for Smart Cities Particle Swarm Optimization Based MPPT Approach: IEEE Access, 6, 58427-58438.
- M. M. Ahmed, W. S. Hassanein, N. A. Elsonbaty, and M. A. Enany (2020). Proposing and evaluation of MPPT algorithms for high-performance stabilized WIND turbine driven DFIG: Alexandria Engineering Journal, 59(6), 5135-5146.
- A. Ali, K. Almutairi, S. Padmanaban, V. Tirth, S. Algarni et al (2020). Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition—A Retrospection: IEEE Access, 8, 127368-127392.

- C. H. Hussaian Basha and C. Rani (2020). Performance Analysis of MPPT Techniques for Dynamic Irradiation Condition of Solar PV: *International Journal of Fuzzy Systems*, 22(8), 2577-2598.
- A. Kihal, F. Krim, A. Laib, B. Talbi, and H. Afghoul (2019). An improved MPPT scheme employing adaptive integral derivative sliding mode control for photovoltaic systems under fast irradiation changes: *ISA Trans*, 87, 297-306.
- J. Macaulay and Z. Zhou (2018). A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System: *Energies*, 11(6), 1340.
- M. Gunasekaran, V. Krishnasamy, S. Selvam, D. J. Almakhlles, and N. Anglani (2020). An Adaptive Resistance Perturbation Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Applications: *IEEE Access*, 8, 196890-196901.
- A. Harrag and S. Messalti (2019). IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances: *Energy Procedia*, 57, 362-374.
- A. Loukriz, M. Haddadi, and S. Messalti (2016). Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems: *ISA Trans*, 62, 30-38.
- M. Jiang, M. Ghahremani, S. Dadfar, H. Chi, Y. N. Abdallah, and N. Furukawa (2021). A novel combinatorial hybrid SFL-PS algorithm based neural network with perturb and observe for the MPPT controller of a hybrid PV-storage system: *Control Engineering Practice*, 114, 104880.
- N. Priyadarshi, S. Padmanaban, J. B. Holm-Nielsen, F. Blaabjerg, and M. S. Bhaskar (2020). An Experimental Estimation of Hybrid ANFIS-PSO-Based MPPT for PV Grid Integration Under Fluctuating Sun Irradiance: *IEEE Systems Journal*, 14(1), 1218-1229.
- M. Sujith and S. Padma (2020). Implementation of PSOANN Optimized PI Control Algorithm for Shunt Active Filter: *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 122(3), 863-888.
- K. Yung Yap, C. R. Sarimuthu, and J. Mun-Yee Lim (2020). Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(6), 1043-1059.
- O. Abdel-Rahim, N. Alamir, M. Orabi, and M. Ismeil (2020). Fixed-frequency phase-shift modulated PV-MPPT for LLC resonant converters: *Journal of Power Electronics*, 20(1), 279-291.
- K. Ali, L. Khan, Q. Khan, S. Ullah, and N. Ali (2021). Neurofuzzy robust backstepping based MPPT control for photovoltaic system: *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES*, 29(1), 421-436.
- S. Bhattacharyya, D. S. Kumar P, S. Samanta, and S. Mishra (2021). Steady Output and Fast Tracking MPPT (SOFT-MPPT) for P&O and InC Algorithms: *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 293-302.
- M. Y. Ali Khan, H. Liu, Z. Yang, and X. Yuan (2020). A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters: *Energies*, 13(16), 4185.
- R. Errouissi, A. Al-Durra, and S. M. Muyeen (2016). A Robust Continuous-Time MPC of a DC-DC Boost Converter Interfaced With a Grid-Connected Photovoltaic System: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(6), 1619-1629.

- H. Liao, X. Zhang, and Z. Ma (2021). Robust dichotomy solution-based model predictive control for the grid-connected inverters with disturbance observer: CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 5(2), 81-89.
- R. O. Ramirez, C. R. Baier, F. Villarroel, J. R. Espinoza, J. Pou, and J. Rodriguez (2020). A Hybrid FCS-MPC With Low and Fixed Switching Frequency Without Steady-State Error Applied to a Grid-Connected CHB Inverter: IEEE Access, 8, 223637- 223651.
- W. Alhosaini, Y. Wu, and Y. Zhao (2019). An Enhanced Model Predictive Control Using Virtual Space Vectors for Grid-Connected Three-Level Neutral-Point Clamped Inverters: IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(4), 1963-1972.
- M. Aourir, A. Abouloifa, I. Lachkar, C. Aouadi, F. Giri, and J. M. Guerrero (2020). Nonlinear control and stability analysis of single stage grid-connected photovoltaic systems: International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 115.
- M. A. Ebrahim, A. Osama, K. M. Kotb, and F. Bendary (2019). Whale inspired algorithm based MPPT controllers for grid-connected solar photovoltaic system: Energy Procedia, 162, 77-86.
- X. Ge, F. W. Ahmed, A. Rezvani, N. Aljojo, S. Samad, and L. K. Foong (2020). Implementation of a novel hybrid BAT-Fuzzy controller based MPPT for grid-connected PV-battery system: Control Engineering Practice, 98, 104380