

การประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

ไพโรจน์ ทองประศรี^{1*} และธาม สุทธิ¹
 pairote@eng.srcku.ac.th^{1*}, tham.su@ku.th¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

Received: July 23, 2024 Revised: December 6, 2024 Accepted: December 24, 2024

บทคัดย่อ

ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงเป็นเทคโนโลยีสำหรับการจำลองฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำที่มีความน่าเชื่อถือสูง โดยไม่ต้องสร้างระบบจริงทำ
 ให้ประหยัดต้นทุน และช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบ บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงรุ่น HIL404 สำหรับ
 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ระบบประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อ
 ร่วมกับวงจรกระดัดแรงดันโดยการปรับค่าตัวจกรทำงานให้เหมาะสมเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้กับโหลด วิธีการสร้างแบบจำลอง
 โครงข่ายประสาทเทียมในฮาร์ดแวร์เสมือนจริงถูกสร้างจากโปรแกรม Matlab/Simulink ผ่านฟังก์ชัน fmi ซึ่งเป็นวิธีการที่ลดความ
 ซับซ้อน แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง ซึ่งมีศักย์แรงดัน 261 V ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,300 W ถูกนำมาใช้
 สำหรับเก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิ และค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาท
 เทียมแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมคือค่าความเข้มรังสี
 อาทิตย์และอุณหภูมิ ส่วนผลลัพธ์ที่ต้องการคือค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด บทความนี้ได้ทดสอบและ
 วิเคราะห์หาฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1 ชั้นซ่อนและแบบ 2 ชั้นซ่อน ผลที่ได้พบว่าฟังก์ชันที่
 เหมาะสมคือ Linear ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละสัมบูรณ์ของแบบ 1 ชั้นซ่อนมีค่า 31.114 ส่วนแบบ 2 ชั้นซ่อนมีค่า 8.248 โดย
 โครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นซ่อนมีเกณฑ์การพยากรณ์ค่อนข้างแม่นยำ นอกจากนี้บทความได้ทดสอบเปรียบเทียบกับสมรรถนะของ
 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน กับวิธีการรบกวนและสังเกต โดยใช้ชุดข้อมูล
 1,200 ข้อมูล โหลดเป็นความต้านทาน 45 Ω ผลทดสอบที่ได้ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน
 เกิดค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดสูงกว่าแบบวิธีการรบกวนและสังเกตเล็กน้อยและสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถูกต้อง

คำสำคัญ: ฮาร์ดแวร์เสมือนจริง โครงข่ายประสาทเทียม แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ฟังก์ชันการแปลง การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

Application of hardware-in-the-loop for maximum power tracking of solar panels using artificial neural network

Pairote Thongprasri^{1*} and Tharn Sutthi¹
 pairote@eng.srcku.ac.th^{1*}, tharn.su@ku.th¹

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Siracha, Kasetsart University Siracha Campus

Received: July 23, 2024 Revised: December 6, 2024 Accepted: December 24, 2024

Abstract

Hardware-in-the-Loop (HIL) is a technology for simulating hardware in a highly reliable iterative manner without the need to create a physical system, which reduces costs and shortens system development time. This paper presents the application of the HIL404 model for the maximum power point tracking (MPPT) system of solar panels using an artificial neural network (ANN) method. The system includes solar panels connected to a boost converter, which adjusts the optimal duty cycle to supply maximum power to the load. The ANN model, created in Matlab/Simulink through the fmi function, simplifies the simulation process. Data on solar radiation, temperature, and voltage were collected from seven DXPT2-Z-330 solar panels with a voltage rating of 261 V at a maximum power of 2,300 W over one week to train the feedforward ANN using backpropagation. The training dataset consists of solar radiation intensity and temperature, with the target output being the system voltage that maximizes power. The paper evaluates the optimal transfer function for single-layer and two-layer hidden neural networks. Results indicate that the Linear function is most effective, with a mean absolute percentage error of 31.114 for the single-layer model and 8.248 for the two-layer model, showing the two-layer network to be more accurate. Additionally, the paper compares the performance of the MPPT system using both ANN models with the perturb and observe (P&O) method on a dataset of 1,200 data points. The load is a 45-ohm resistor. The test results show that the two-layer hidden neural network's MPPT system produced slightly higher power at the load than the P&O method and was able to accurately track the maximum power.

Keywords: Hardware-in-the-loop, Artificial neural network, Solar panel, Transfer function, Maximum power tracking.

1. บทนำ

วิธีการหรือระบบที่ได้ถูกคิดค้นหรือถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยต่างๆ โดยทั่วไปถูกนำเสนอผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือโปรแกรมที่เกี่ยวข้องเพื่อลดต้นทุน ทางปฏิบัติจำเป็นต้องสร้างระบบหรือฮาร์ดแวร์ขึ้นมาเพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง ซึ่งทำให้มีต้นทุนและต้องใช้เวลา ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงเป็นเทคโนโลยีสำหรับการจำลองฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำ (hardware-in-the-loop) สามารถช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการพัฒนาระบบ ประหยัดต้นทุนสำหรับกระบวนการออกแบบระบบต่างๆ โดยไม่ต้องสร้างระบบจริง มีการจำลองตามเงื่อนไขการทำงาน ความผิดพลาด และสภาพแวดล้อมในสถานะต่างๆ ทำให้สามารถทดสอบระบบได้อย่างครอบคลุม โดยมีส่วนเชื่อมต่อซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย มีความน่าเชื่อถือสูง จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงถูกใช้เป็นทั้งแพลตฟอร์มด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เฉพาะทางสำหรับการจำลองและทดสอบระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [1] การใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงในระบบการประจุและการจัดการแบตเตอรี่ ซึ่งมีการออกแบบการควบคุมแบบเรียนรู้ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการเข้าถึงสำหรับการจัดการแบตเตอรี่ [2] ใน [3] ได้มีการนำเสนอแพลตฟอร์มฮาร์ดแวร์เสมือนจริงของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติได้หลายพอร์ต เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ เทคนิคการควบคุมใหม่สำหรับการเชื่อมต่อระบบการแปลงกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้เหตุการณ์ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ถูกนำเสนอใน [4] โดยใช้การควบคุมแบบ PI ซึ่งได้รับการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องผ่านฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีแหล่งกำเนิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ [5] และค่าความชื้นในอากาศที่สูงขึ้น [6] ซึ่งส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้า ความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [7] เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่กับที่ เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking: MPPT) ถูกนำมาใช้เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดตามช่วงเวลาของวัน [8] การติดตาม

กำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวิธีการรบกวนและสังเกต (perturb and observe: P&O) เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน หลักการคือหาจุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อน เพื่อนำมาวิเคราะห์ว่าควรเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของระบบ ข้อด้อยคือปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในสภาวะคงตัว [9] เทคนิคการเพิ่มความนำ (incremental conductance : IC) สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ โดยการนำแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมาคำนวณ และเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงแบบทันเวลา (real time) วิธีนี้มีความซับซ้อนและใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต [10] โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network: ANN) คือ โมเดลทางคณิตศาสตร์ชนิดหนึ่งที่สามารถรวบรวมและเรียนรู้ข้อมูลผ่านกระบวนการเรียนรู้ (learning process) พร้อมกับนำสิ่งที่เรียนรู้นั้นมาปรับเปลี่ยนค่าด้วยการประมวลผล เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาเฉพาะด้าน กระบวนการดังกล่าวนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นของคำตอบที่ต้องการ ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาโดยอ้างอิงหลักการทำงานจากระบบประสาทในสมองของมนุษย์ ที่มีเซลล์ประสาท จุดที่ใช้ประสานประสาทที่เป็นการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาทด้วยรูปแบบแขนรับสัญญาณ โครงข่ายประสาทเทียมนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น ใช้ในการประมวลผลการทำงานของระบบรถยนต์ไร้คนขับ หรือใช้เพื่อตรวจสอบข้อมูล จำแนกผลิตภัณฑ์ เป็นต้น การใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถเรียนรู้การทำงานที่ซับซ้อนได้ ทำให้พยากรณ์จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำ มีความรวดเร็วในการติดตาม [11][12] เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกบังแสงบางส่วน โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ variable step size ถูกนำเสนอใน [13] ซึ่งมีสมรรถนะดีกว่า เมื่อทดสอบเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink วิธีการปรับแรงดันอ้างอิงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมใน [14] เมื่อสภาพบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว สามารถกำหนดจุดทำงานที่เหมาะสม ซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี IC และ P&O โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink แอปพลิเคชัน GUI ถูกนำเสนอ [15] เป็นเครื่องมือทางการศึกษาสำหรับอธิบายและวิเคราะห์เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ง่ายต่อผู้เริ่มต้นศึกษา วิธีการออกแบบ

ระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบ P&O ตั้งเดิมมุ่งเน้นเฉพาะทิศทางภายใต้สภาวะแบบไดนามิก ในขณะที่ประสิทธิภาพแบบสถิตจะต่ำ แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ [16] นำเสนอวิธีการหาประสิทธิภาพแบบสถิตและแบบไดนามิกใน [17] นำเสนออัลกอริทึมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เทคนิค P&O ร่วมกับตัวควบคุมพีซีลอจิก ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสีอย่างรวดเร็วโดยไม่ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์เพิ่มเติม เมื่อจุดการทำงานถึงสภาวะคงที่สามารถหยุดการรบกวนเทียมใดๆ ทำให้การสูญเสียพลังงานลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมแบบเดิม อัลกอริทึมของ GMPPT แบบสองขั้นตอนใหม่ใน [18] นำเสนอสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้จุดลุ่มตัวอย่างน้อยกว่า GMPPT แบบอื่นๆ ทำให้ช่วยลดทั้งเวลาและการสูญเสียพลังงานที่เกี่ยวข้องในการติดตาม ตัวควบคุมที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายนำเสนอนใน [19] เพื่อลดความต้องการในการคำนวณเกี่ยวกับวิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบเดิม โดยประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมถูกพิสูจน์ผ่านการทดลองบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

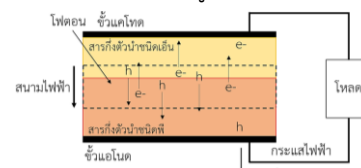
เพื่อลดต้นทุนการสร้างฮาร์ดแวร์ บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงรุ่น HIL404 ในระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมผ่านฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสม แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง ซึ่งมีกำลังแรงดัน 261 V ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,300 W ถูกนำมาใช้สำหรับเก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิ และค่าแรงดันไฟฟ้า สำหรับใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม สมรรถนะของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งใช้ฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสมแบบ 1 ชั้นซ่อน และแบบ 2 ชั้นซ่อน ได้ถูกตรวจสอบโดยเปรียบเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต

2. ระบบผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งที่ประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า กระบวนการนี้เรียกว่า "โฟโตโวลตาอิก" ซึ่งใช้วัสดุซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์จนกลายเป็นแผ่นซิลิกอนบริสุทธิ์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์คือ

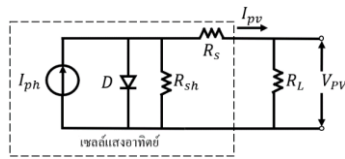
เมื่อมีรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นเซลล์ รังสีอาทิตย์ที่ประกอบด้วยโฟตอนจะทำให้เกิดประจุบวกและอิเล็กตรอน ประจุบวกจะถูกส่งไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ส่วนประจุลบจะถูกส่งไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อประจุสะสมจนถึงจุดที่มีพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนสามารถก้าวข้ามแรงดึงดูดของอะตอมและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ผลที่ได้คือสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า กระบวนการนี้ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ครบวงจร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานของรอยต่อพีเอ็น

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอด I_{ph} คือกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ความเข้มรังสีอาทิตย์ในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้า ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5 % เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเฉลี่ยทุกๆ 1 °C ความเข้มรังสีอาทิตย์ มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้า เมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้นกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นตาม ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนไดโอดแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพีเอ็น โดยกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (I_{pv}) คือความแตกต่างระหว่างกระแส I_{ph} และกระแสไดโอด (I_D) ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แทนด้วยความต้านทาน R_s และ R_{sh}

แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง ดังรูปที่ 3 ใช้สำหรับเก็บข้อมูลเพื่อนำไปสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์



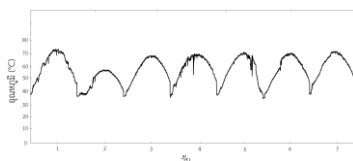
รูปที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

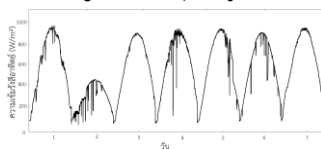
รุ่น DXP72-Z-330	พิกัด
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax)	330 (W)
จำนวนเซลล์ต่อแผง	72 (Ncell)
แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vmp)	37.4 (V)
กระแสไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Imp)	8.83 (A)
แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Voc)	45.8 (V)
กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร (Isc)	9.28 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Voc	-0.32 (%/°C)
ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Isc	0.05 (%/°C)



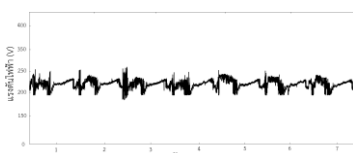
รูปที่ 4 Solar IV Full PV System Analyzer



รูปที่ 5 ค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 6 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์

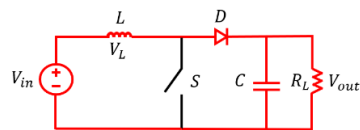


รูปที่ 7 ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 4 แสดงเครื่องมือวัด Solar IV Full PV System Analyzer ใช้สำหรับเก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิและค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ระหว่างวันที่ 18 ถึง 24 กันยายน 2566 เวลา 07:00 น. ถึง 17:00 น. ซึ่งผลของค่าอุณหภูมิ ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 ตามลำดับ

2.2 วงจรยกระดับแรงดัน

วงจรยกระดับแรงดันที่ใช้ดังแสดงรูปที่ 8 ข้อดีคือลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบกำหนดเงื่อนไขดังนี้ แรงดันอินพุตระบบ 261 V (แผงเซลล์อาทิตย์ 7 แผงต่ออนุกรมกัน) แรงดันเอาต์พุตกำหนดที่ 320 V (อ้างอิงเมื่อนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ 220 V_{AC}) ค่าอัตราระลอกคลื่น 1% กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 2,300 W ความถี่การสวิตช์ 20,000 Hz ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย ตัวต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 45Ω ตัวเหนี่ยวนำ (L) เท่ากับ $136\mu H$ และตัวเก็บประจุเท่ากับ $20\mu H$ โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องดังนี้



รูปที่ 8 วงจรยกระดับแรงดัน

$$V_{out} = \left(\frac{1}{1-D} \right) V_{in} \quad (1)$$

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2)$$

$$C = \frac{D}{Rf \left(\frac{\Delta V_{out}}{V_o} \right)} \quad (3)$$

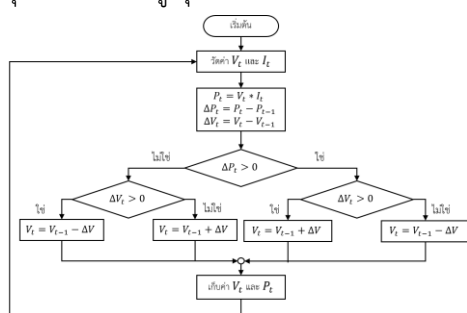
โดยที่ f คือความถี่การสวิตช์ (Hz) D เป็นวัฏจักรทำงาน และ $\left(\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} \right)$ หมายถึงอัตราระลอกคลื่น

3. เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

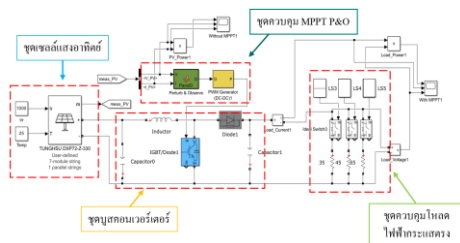
3.1 วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต

วิธีการรบกวนและสังเกตเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากใช้เทคนิคการคำนวณที่มีความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้หลักการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์

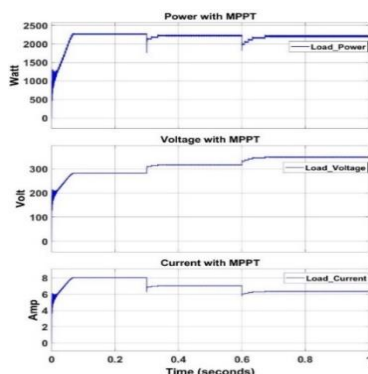
แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบัน (P_t) กับคาบเวลาก่อน (P_{t-1}) เพื่อนำมาวิเคราะห์ประกอบการตัดสินใจว่าจะเพิ่มหรือลดวัฏจักรทำงาน (duty cycle: D) ของวงจรระดับแรงดัน ดังแสดงผังการทำงานในรูปที่ 9 ที่คาบเวลาปัจจุบัน เมื่อแรงดันไฟฟ้า ΔV_t และกำลังไฟฟ้า ΔP_t มีค่าเป็นบวกหรือลบทั้งคู่ บ่งบอกว่าระบบมีความสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีแนวโน้มเข้าใกล้จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในทางตรงกันข้ามถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแล้วทำให้กำลังไฟฟ้าลดลง แสดงว่ามีการออกจากจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 9 แฝงผังการทำงานวิธี P&O



รูปที่ 10 แบบจำลอง MPPT วิธี P&O



รูปที่ 11 ผลจำลองการทำงาน MPPT วิธี P&O

แบบจำลองการทำงานการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตรูปที่ 10 ทดสอบการทำงานโดยสร้าง

จากโปรแกรม Matlab/Simulink กำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 1,000 W/m² และอุณหภูมิ 25 °C ปรับโหลด 3 ระดับ ดังนี้ ที่ช่วงเวลา 0 ถึง 0.3 วินาที ความต้านทาน 35 Ω ช่วงเวลาที่ 0.3 ถึง 0.6 วินาที ความต้านทาน 45 Ω และช่วงเวลาที่ 0.6 ถึง 1 วินาที ความต้านทาน 55 Ω วัดค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสของโหลดความต้านทาน

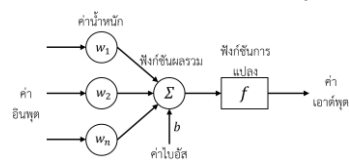
ผลจำลองการทำงานรูปที่ 11 เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงระบบได้ปรับวัฏจักรทำงานของวงจรระดับแรงดัน ส่งผลให้ได้แรงดันของระบบที่เหมาะสมทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มีค่า 2,250 W งานวิจัยนี้วิธีการรบกวนและสังเกตถูกใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอ

3.2 วิธีการการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

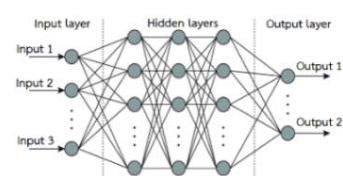
เซลล์ประสาทเทียมใช้วิธีการประมวลผลผลลัพธ์ทางด้านคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 12 ประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลอินพุต 2) ค่าน้ำหนัก 3) ฟังก์ชันผลรวม และ 4) ฟังก์ชันการแปลง ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้จาก

$$f(x) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (4)$$

โดยที่ x_i คือ ค่าอินพุตของข้อมูล
 w_i คือ ค่าน้ำหนัก
 b คือ ค่าไบอัส
 n คือ จำนวนค่าอินพุตของข้อมูล



รูปที่ 12 โครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียม



รูปที่ 13 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

โครงข่ายประสาทเทียมรูปที่ 13 ประกอบด้วยเซลล์ประสาทเทียมจำนวนมากที่เชื่อมต่อกันเป็นชั้นข้อมูลต่างๆ ดังนี้ ชั้นอินพุตเป็นชั้นแรกที่ได้รับข้อมูลเข้าสู่ระบบ ชั้นซ่อนอยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลโดยใช้ค่าน้ำหนัก ค่าไบอัส และฟังก์ชันการแปลง ในส่วนสุดท้ายคือชั้นเอาต์พุตเป็นชั้นรวมผลจากชั้นซ่อนเพื่อแปลงเป็นค่าผลลัพธ์ใช้งาน

ฟังก์ชันการแปลงเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งนำความไม่เป็นเชิงเส้นมาคำนวณเพื่อจับคู่ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างข้อมูล งานวิจัยนี้ได้ทดสอบเพื่อเลือกฟังก์ชันที่เหมาะสมจากฟังก์ชันการแปลง 5 ประเภท ต่อไปนี้

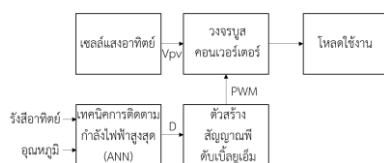
i. ฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้น (linear activation function: Linear) คำนวณผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักข้อมูลอินพุตและไม่มีค่าการแปลงใดๆ เพิ่มเติมในเชิงคณิตศาสตร์

ii. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid activation function: Sigmoid) จับคู่ความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุตในช่วง 0 ถึง 1 เอาต์พุตมีลักษณะคล้ายกับความน่าจะเป็น

iii. ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์ (hyperbolic tangent activation function: Tanh) คล้ายฟังก์ชันซิกมอยด์แต่มีช่วงค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 และมีความสมมาตรรอบจุดกำเนิด

iv. ฟังก์ชันเส้นตรงแบบแก้ไข (rectified linear unit activation function: ReLU) แทนค่าข้อมูลอินพุตเชิงลบทั้งหมดด้วย 0 และคงค่าบวกไว้ไม่เปลี่ยนแปลง กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1 สำหรับข้อมูลบวก และเป็นเส้นแนวนอนที่ค่า 0 สำหรับข้อมูลลบ

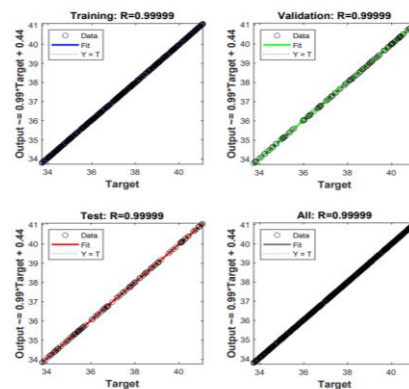
v. ฟังก์ชันแบบเรเดียลเบส (radial basis activation function: RBF) อินพุตอยู่ห่างจากค่าเฉลี่ยส่งผลให้ค่าเอาต์พุตลดลงตามเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ ซึ่งมีจุดทำงานอยู่ในช่วง 0 ถึง 1



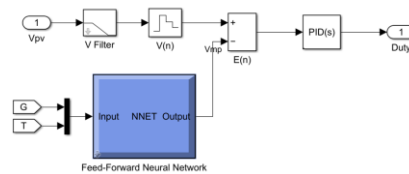
รูปที่ 14 บล็อกไดอะแกรมการทำงานวิธี ANN

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นแบบ 1 ชั้นซ่อนหรือ 2 ชั้นซ่อน ซึ่งแต่ละชั้นซ่อนมีจำนวน 10 เซลล์ ลักษณะการ

ทำงานแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า (feedforward) ใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (backpropagation) บทความนี้ได้ทำการทดสอบหาฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสมจากฟังก์ชันการแปลง 5 รูปแบบ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละสัมบูรณ์ชุดข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม คือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับค่าผลลัพธ์ที่ต้องการคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลดของวงจรยกระดับแรงดันโดยการปรับวัฏจักรทำงานให้เหมาะสม ดังรูปที่ 14



รูปที่ 15 ผลประเมินของ ANN



รูปที่ 16 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การสร้างแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำนวนรอบการฝึกสอนสามารถกำหนดได้มากที่สุด 2,000 รอบ และค่าความผิดพลาดของเป้าหมายอยู่ที่ 0.01 เมื่อการฝึกสอนถึงจำนวนรอบหรือค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ ความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมพิจารณาได้ในรูปที่ 15 สำหรับรูปที่ 16 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับปรับค่าวัฏจักรทำงานของวงจรยกระดับแรงดัน

4. ฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

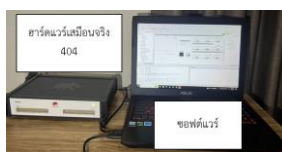
ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงที่ใช้งานเป็นของบริษัท Typhoon ดังรูปที่ 17 ประกอบด้วย 1) HIL scada ใช้ออกแบบกราฟฟิก เชื่อมต่อติดตามและควบคุมการทำงาน 2) Schematic

editor ใช้ออกแบบวงจรและระบบ และ 3) Waveform generator ใช้สำหรับออกแบบและจำลองแบบทันเวลา

รูปที่ 18 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างซอฟต์แวร์และ hardware-in-the-loop รุ่น 404 สามารถแสดง ผลและสั่งงาน ผ่านหน้าต่าง HIL scada ได้ ดังแสดงรูปที่ 19

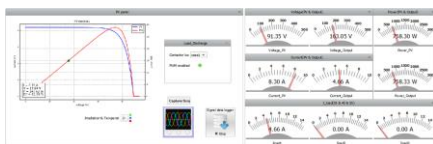


รูปที่ 17 โปรแกรมใช้งานผลิตภัณฑ์ Typhoon

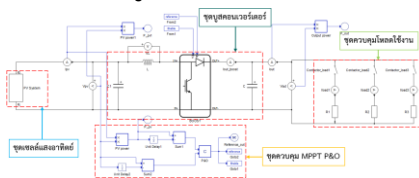


รูปที่ 18 การเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกับซอฟต์แวร์

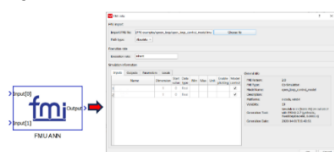
การสร้างแบบจำลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี ควบคุมและสังเกต สามารถสร้างบน Schematic editor ได้ โดยตรงเนื่องจากไม่มีความซับซ้อน โดยใช้หลักการเดียวกับ โปรแกรม Matab/Simulink ดังรูปที่ 20 ประกอบด้วย ชุดเซลล์ แสงอาทิตย์ วงจรยกระดับแรงดัน ชุดควบคุม P&O (สร้างจาก C function) และชุดควบคุมโพล



รูปที่ 19 HIL Scada

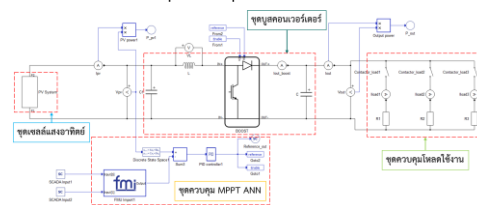


รูปที่ 20 แบบจำลอง MPPT วิธี P&O



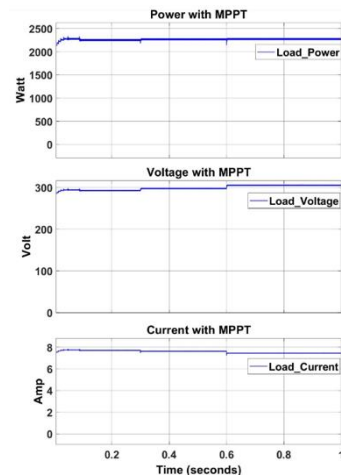
รูปที่ 21 ฟังก์ชัน fmi

เนื่องจากการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม บนฮาร์ดแวร์เสมือนจริงโดยตรง มีความยุ่งยากและซับซ้อน ทางเลือกที่ดีคือสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมใน โปรแกรม Matlab/Simulink แล้วส่งถ่ายไปยัง Schematic editor ผ่านฟังก์ชัน fmi (functional mock-up Interface) ดัง รูปที่ 21 แบบ จำลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่าย ประสาทเทียมรูปที่ 22 มีส่วนประกอบคล้ายวิธีการควบคุมและ สังเกต ต่างกันที่ส่วนชุดควบคุมเปลี่ยนใช้ ANN แทน



รูปที่ 22 แบบจำลอง MPPT วิธี ANN

จำนวนอินพุตที่ใช้ทดสอบ 240 ชุดข้อมูล โดย กำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิ 25°C คงที่ทั้ง 240 ชุดข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบ 2 ชั้นซ่อน สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 ใช้ฟังก์ชัน Linear และชั้นซ่อนที่ 2 ใช้ฟังก์ชัน Sigmoid โดยปรับโหนด 3 ระดับดังนี้ ที่ช่วงเวลา 0 ถึง 0.3 วินาที ความต้านทาน $35\ \Omega$ ช่วงเวลาที่ 0.3 ถึง 0.6 วินาที ความต้านทาน $45\ \Omega$ และช่วงเวลาที่ 0.6 ถึง 1 วินาที ความต้านทาน $55\ \Omega$ ผลการทดสอบรูปที่ 23 พบว่าเมื่อโหนดมีการเปลี่ยนแปลงระบบทำการปรับเปลี่ยนแรงดันให้เหมาะสม ทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มีค่าเท่ากับ $2,247 \text{ W}$



รูปที่ 23 ผลการทำงานของ MPPT วิธี ANN 2 ชั้นซ่อน

5. ผลการทดลองบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละสัมบูรณ์ (mean absolute percent error: %MAPE) เป็นวิธี การวัดความแม่นยำเชิงประสิทธิภาพ โดยการคำนวณร้อยละความผิดพลาดในการพยากรณ์ของข้อมูลเป้าหมาย ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างค่าเป้าหมายและค่าเอาต์พุต ค่า %MAPE สามารถได้จากสมการ (5) เกณฑ์สำหรับการพยากรณ์มีดังนี้

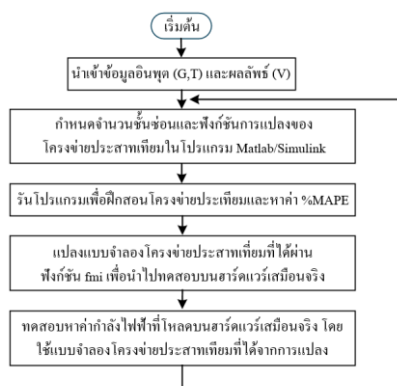
- ค่า %MAPE น้อยกว่า 10 หมายถึงการพยากรณ์ค่อนข้างแม่นยำ
- ค่า %MAPE อยู่ระหว่าง 10-20 หมายถึงการพยากรณ์ใช้ได้ดี
- ค่า %MAPE อยู่ระหว่าง 20-50 หมายถึงการพยากรณ์พอใช้
- ค่า %MAPE มากกว่า 50 หมายถึงการพยากรณ์ไม่แม่นยำ

$$\%MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|x_i - y_i|}{|x_i|} \right) \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ n คือจำนวนของข้อมูล y_i เป็นค่าเป้าหมาย และ x_i คือค่าจริงของข้อมูลหรือค่าเอาต์พุต

ฟังก์ชันการแปลงเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม ลำดับถัดไปทำการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสม

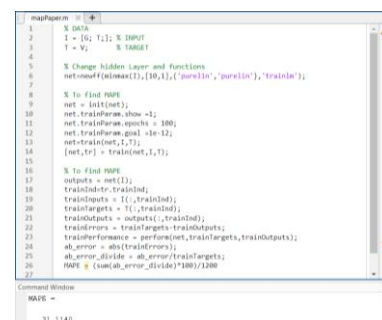
ข้อมูลสำหรับสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกเก็บระหว่างวันที่ 18 ถึง 24 กันยายน 2566 ตั้งแต่เวลา 07:00 ถึง 17:00 น. ทุก 30 วินาที โดยมีชุดข้อมูลสะสมเป็นจำนวน 8,400 ข้อมูลตลอด 1 สัปดาห์



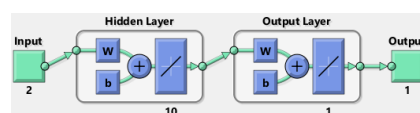
รูปที่ 24 วิธีหาจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลง

การทดสอบเพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลง โดยมีขั้นตอนทำงานดังรูปที่ 24 ดังนี้ เลือกใช้ข้อมูล 1 วัน (ชุดข้อมูล 1,200 ข้อมูล) พิจารณาจากความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุดตลอดวัน ค่าอินพุตที่ใช้คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (G) และอุณหภูมิ (T) ส่วนค่าเอาต์พุตหรือผลลัพธ์ที่ต้องการคือ แรงดันไฟฟ้า (V) กำหนดชั้นซ่อนเป็นแบบ 1 ชั้นซ่อน หรือแบบ 2 ชั้นซ่อน แต่ละชั้นซ่อนมีจำนวน 10 เซลล์ ส่วนฟังก์ชันการแปลงมี 5 รูปแบบ ได้แก่ Linear, Sigmoid, Tanh, ReLU และ RBF โดยจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลงกำหนดตามตารางที่ 2 และ 3 ลำดับถัดไปทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียมและหาค่า %MAPE ผ่านโปรแกรม Matlab/ Simulink บันทึกค่าสำหรับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จะถูกแปลงผ่านฟังก์ชัน fmi เพื่อทดสอบบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริงโดยใช้แบบจำลองในรูปที่ 22 จำลองการทำงานโดยกำหนดโหลดคงที่ 45 Ω บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โหลดสูงสุดของตารางที่ 2 และ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลงทำให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเปลี่ยน ซึ่งกระบวนการวนซ้ำตามผังการทำงาน

ผลตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน ฟังก์ชันการแปลง Linear ค่า %MAPE มีค่า 31.114 ดังรูปที่ 25 (ก) และมีโครงสร้างดังรูปที่ 25 (ข)



(ก) ค่า %MAPE 31.114



ข) ฟังก์ชันการแปลงแบบ Linear

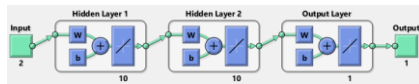
รูปที่ 25 โครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน

```

1 % Data
2 I = [0; 1]; % INPUT
3 T = V; % TARGET
4
5 % Change hidden layer and functions
6 net=nnf([10,10,1],{'tansig','purelin','purelin'},'trainlm');
7
8 % To find MAPE
9 net = init(net);
10 net.trainParam.show = 1;
11 net.trainParam.epochs = 100;
12 net.trainParam.goal = 1e-12;
13 net=train(net,1,T);
14 [net,tr] = train(net,1,T);
15
16 % To find MAPE
17 outputs = net(I);
18 tr=trains(net);
19 trainInputs = I(:,trainsInd);
20 trainTargets = T(:,trainsInd);
21 trainOutputs = outputs(:,trainsInd);
22 trainErrors = trainTargets-trainOutputs;
23 trainPerformance = perform(net,trainTargets,trainOutputs);
24 ab_error = abs(trainErrors);
25 ab_error_divide = ab_error/trainTargets;
26 MAPE = (sum(ab_error_divide)*100)/1000;
27
28 Command Window
29 MAPE =
30 8.2480

```

(ก) ค่า %MAPE 8.248



ข) ฟังก์ชันการแปลงเป็นแบบ Linear ทั้ง 2 ชั้นซ่อน
รูปที่ 26 โครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน

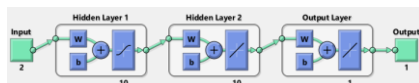
ผลตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อนที่มี
ฟังก์ชันการแปลง Linear ค่า %MAPE มีค่า 8.248 ดังรูปที่ 26
(ก) โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 26 (ข)

```

1 % Data
2 I = [0; 1]; % INPUT
3 T = V; % TARGET
4
5 % Change hidden layer and functions
6 net=nnf([10,10,1],{'tansig','purelin','purelin'},'trainlm');
7
8 % To find MAPE
9 net = init(net);
10 net.trainParam.show = 1;
11 net.trainParam.epochs = 100;
12 net.trainParam.goal = 1e-12;
13 net=train(net,1,T);
14 [net,tr] = train(net,1,T);
15
16 % To find MAPE
17 outputs = net(I);
18 tr=trains(net);
19 trainInputs = I(:,trainsInd);
20 trainTargets = T(:,trainsInd);
21 trainOutputs = outputs(:,trainsInd);
22 trainErrors = trainTargets-trainOutputs;
23 trainPerformance = perform(net,trainTargets,trainOutputs);
24 ab_error = abs(trainErrors);
25 ab_error_divide = ab_error/trainTargets;
26 MAPE = (sum(ab_error_divide)*100)/1000;
27
28 Command Window
29 MAPE =
30 10.3600

```

(ก) ค่า %MAPE 10.360



ข) ฟังก์ชันการแปลง Tanh และ Linear
รูปที่ 27 โครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน

ผลตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อนที่มี
ฟังก์ชันการแปลง Tanh และ Linear มีค่า %MAPE เท่ากับ
10.360 โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 27 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ MPPT วิธี ANN 1 ชั้นซ่อน

รูปแบบ	ฟังก์ชัน	%MAPE	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (W)
1	Linear	31.114	1,592.430
2	Sigmoid	31.189	1,590.697
3	Tanh	31.696	1,578.988
4	ReLU	31.227	1,589.830
5	RBF	31.189	1,590.697

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ MPPT วิธี ANN 2 ชั้นซ่อน

รูปแบบ	ฟังก์ชัน		%MAPE	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (W)
	ชั้นซ่อน1	ชั้นซ่อน2		
1	Linear	Linear	8.248	2,121.029
2	Linear	Sigmoid	8.443	2,116.515
3	Linear	Tanh	8.318	2,119.409
4	Linear	ReLU	8.336	2,119.000
5	Linear	RBF	10.360	2,072.200
6	Sigmoid	Linear	10.360	2,072.200
7	Sigmoid	Sigmoid	10.495	2,069.086
8	Sigmoid	Tanh	10.383	2,071.682
9	Sigmoid	ReLU	10.293	2,073.750
10	Sigmoid	RBF	10.559	2,067.591
11	Tanh	Linear	10.360	2,072.200
12	Tanh	Sigmoid	10.338	2,072.719
13	Tanh	Tanh	10.338	2,072.718
14	Tanh	ReLU	10.383	2,071.682
15	Tanh	RBF	10.315	2,073.236
16	ReLU	Linear	10.360	2,072.200
17	ReLU	Sigmoid	10.338	2,072.719
18	ReLU	Tanh	10.338	2,072.719
19	ReLU	ReLU	10.315	2,073.236
20	ReLU	RBF	10.293	2,073.750
21	RBF	Linear	10.342	2,072.622
22	RBF	Sigmoid	10.582	2,067.069
23	RBF	Tanh	10.360	2,072.200
24	RBF	ReLU	10.360	2,072.200
25	RBF	RBF	10.383	2,071.682

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบบนฮาร์ดแวร์เสมือน
จริงของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้โครงข่ายประสาท
เทียมแบบ 1 ชั้นซ่อน เมื่อใช้ฟังก์ชัน Linear เป็นฟังก์ชัน
สำหรับการแปลงได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,592.430 W แต่เมื่อ
พิจารณาค่า %MAPE เท่ากับ 31.114 อยู่ในเกณฑ์การพยากรณ์
พอใช้

การทดสอบบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริงของระบบ
ติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2
ชั้นซ่อน แต่ละชั้นซ่อนปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการแปลง 5 รูปแบบ
ดังนั้นจะเกิดฟังก์ชันจับคู่กัน 25 รูปแบบ ผลการทดสอบตาราง
ที่ 3 ค่าที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,121.029 W และ %MAPE มี
ค่า 8.248 อยู่ในเกณฑ์การพยากรณ์ ค่อนข้างแม่นยำ โดย
ฟังก์ชันการแปลงทั้ง 2 ชั้นซ่อน คือ Linear

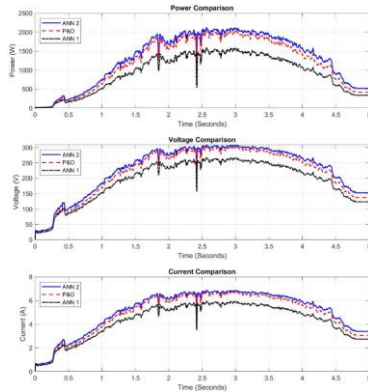
จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียม
ในระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เป็นแบบป้อนข้อมูลไป
ข้างหน้า ใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ มี 2 ชั้นซ่อน โดยทั้ง
2 ชั้นซ่อนใช้ฟังก์ชันการแปลง Linear

ทดสอบเปรียบเทียบระบบติดตามกำลังสูงสุดวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน ฟังก์ชันการแปลง Linear (ANN1) และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน ทั้ง 2 ชั้นซ่อนใช้ฟังก์ชันการแปลง Linear (ANN2) กำหนดสมการและเงื่อนไขดังนี้

i. ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เลือกใช้ 1 วัน (ชุดข้อมูล 1,200 ข้อมูล) พิจารณาจากความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุดตลอดวัน

ii. กำหนดโหลดคงที่ 45 Ω

ทดสอบการทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบ ได้แก่ P&O, ANN1 และ ANN2 นำผลการทดสอบวาดรูปกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสของโหลด



รูปที่ 28 ผลการทำงาน MPPT วิธี P&O, ANN1 และ ANN2

ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 28 ซึ่งวิธี ANN2 สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เช่นเดียวกับวิธี P&O แต่กำลังไฟฟ้าที่ได้สูงกว่าเล็กน้อย ส่วน ANN1 ระบบติดตามกำลังไฟฟ้าคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากใช้ชั้นซ่อนไม่เหมาะสม ทำให้ค่า %MAPE สูง

6. สรุปผล

เพื่อลดต้นทุนการสร้างระบบหรือฮาร์ดแวร์บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริง รุ่น HIL404 ในระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง พิกัดแรงดัน 261 V ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,300 W โดยมีการทดสอบการใช้แบบจำลอง 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน โดยเลือกใช้ฟังก์ชัน 5 รูปแบบ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลต่อเกณฑ์การพยากรณ์

โดยได้ฟังก์ชันที่เหมาะสมคือ Linear ทั้งแบบ 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน แต่แบบจำลอง 2 ชั้นซ่อนให้ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละสมบูรณ์ต่ำกว่าแบบ 1 ชั้นซ่อน ซึ่งมีค่า %MAPE ที่ 8.248 เกณฑ์การพยากรณ์ค่อนข้างแม่นยำ

วิธีการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทในฮาร์ดแวร์เสมือนจริงถูกสร้างจากโปรแกรม Matlab/ Simulink ผ่านฟังก์ชัน fmin ผลของเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน กับวิธีการรบกวนและสังเกต ผลทดสอบที่ได้ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดถูกต้องเช่นเดียวกับวิธีการรบกวนและสังเกต แต่เกิดค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดสูงกว่าแบบวิธีการรบกวนและสังเกตเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะที่ได้สูงกว่าเล็กน้อย

ข้อเด่นของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถูกต้อง มีความน่าเชื่อถือซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบ ข้อด้วยชุดข้อมูลที่ใช้สอนต้องมีจำนวนมากเพียงพอ โดยพิจารณาจากผลของค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละสมบูรณ์ และการกำหนดฟังก์ชันการแปลงและชั้นซ่อนต้องเหมาะสม ในการทดสอบถ้าใช้โครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน ฟังก์ชันการแปลง Linear ค่าของ %MAPE สูงถึง 31.114 ส่งผลให้เกณฑ์พยากรณ์อยู่ในระดับพอใช้ นอกจากผลการทดสอบที่นำเสนอผู้วิจัยได้ทดสอบเพิ่มชั้นซ่อนสูงกว่า 2 ชั้นซ่อน ผลที่ได้ค่าของ %MAPE สูงกว่าแบบจำลอง 2 ชั้นซ่อนเช่นเดียวกัน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือสำหรับใช้ทดลองจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Goni O, Sanchez A, Todorovich E, Castro AD. Resolution analysis of switching converter models for hardware-in-the-loop. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014;10(2):1162-70.

- [2] Park S, Moura S, Lee K. Integration of hardware and software for battery Hardware-in-the-Loop toward battery artificial Intelligence. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024;10(1): 888-900.
- [3] Debnath S, Xia Q, Dong Z, Marthi PRV, Marti S, Kondabathini A. Control system of multi-port autonomous reconfigurable solar power plant (MARS) & HIL platforms for design. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2024;15(3):1423-34.
- [4] Rodriguez-Contreras SF, Salgado-Herrera NM, Robles M, Rodríguez-Rodríguez JR, Gonzalez-Cabrera N, Santoyo-Anaya MA. Photovoltaic energy conversion system integrated into unbalanced distribution electrical networks through hardware in the loop. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2022;10(15):5614-25.
- [5] Mishra S, Ziar H, Isabella O, Zeman M. Selection map for PV module installation based on shading tolerability and temperature coefficient. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2019;9(3):872-80.
- [6] Burduhos BG, Visa I, Duta A, Neagoe M. Analysis of the conversion efficiency of five types of photovoltaic modules during high relative humidity time periods. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2018;8(6):1716-24.
- [7] Khoo YS, Nobre A, Malhotra R, Yang D, Ruther R, Reindl T, et al. Optimal orientation and tilt angle for maximizing in-plane solar irradiation for PV applications in Singapore. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014;4(2):647-53.
- [8] Dallago E, Liberale A, Miotti D, Venchi G. Direct MPPT algorithm for PV sources with only voltage measurements. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015;30 (12):6742-50.
- [9] Salman S, Ai X, Wu Z. Design of a P&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2018;3(3):1-8.
- [10] Sera D, Mathe L, Kerekes T, Spataru SV, Teodorescu R. On the perturb and observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2013;3(3):1070-8.
- [11] Ali M, Tariq M, Lodi KA, Chakraborty RK, Ryan MJ, Alamri B, et al. Robust ANN-based control of modified PUC-5 inverter for solar PV applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021;57(4):3863-76.
- [12] Yap KY, Sarimuthu CR, Lim JMY. Artificial intelligence based MPPT techniques for solar power system: a review. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020;8(6):1043-59.
- [13] Kiran SR, Basha CHH, Singh VP, Dhananjayulu C, Prusty BR, Khan B. Reduced simulative performance analysis of Variable step size ANN based MPPT techniques for partially shaded solar PV systems. *IEEE Access*. 2022;10:48875-89.
- [14] Yilmaz M, Celikel R, Gundogdu A. Enhanced photovoltaic systems performance: anti-windup PI controller in ANN-based ARV MPPT method. *IEEE Access*. 2023;11:90498-09.
- [15] Kayisli K, Caglayan RZ, Colak I. PV-MPPT Lab: A GUI-based education tool for MPPT techniques. *IEEE Transactions on Education*. 2024;67(3):453-61.
- [16] Runze L, Zhu Y, Yang Y. Robust design of perturb & observe maximum power point tracking for photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024; 60(4):6547-58.
- [17] Alhusseini H, Niroomand M, Dehkordi BM. A fuzzy-based adaptive P&O MPPT algorithm for PV systems with fast tracking and Low oscillations under rapidly irradiance change conditions. *IEEE Access*. 2024;12:84374-86.
- [18] Ye SP, Liu YH, Pai HY, Sangwongwanich A, Blaabjerg F. A novel ANN-based GMPPT method for PV systems under complex partial shading conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2024;15(1):328-38.
- [19] Bana PR, Arco SD, Amin M. ANN-based robust current controller for single-stage grid-connected PV with embedded Improved MPPT scheme. *IEEE Access*. 2024;12:100251-62.