

การเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน
โดยใช้การปรับปรุงซูโดกุ 5X5
Performance Enhancement for PV Array under Partial Shading Conditions
Using Modified Sudoku 5X5

ธนกร น้ำหอมจันทร์¹

Thanakorn Namhormchan¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

¹School of Engineering, Eastern Asia University

Received: November 9, 2022

Revised: December 20, 2022

Accepted: December 26, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โมดูลพิกัด 10 วัตต์ อาร์เรย์ขนาด 5X5 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน จำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ Short Wide--SW Short Narrow--SN Long Wide--LW และ Long Narrow--LN ซึ่งใช้การจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าคงเดิม ด้วยเทคนิคการปรับปรุงซูโดกุ จำนวน 4 รูปแบบ ประเมินผลโดยคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าทางทฤษฎี และคำนวณหาสมรรถนะจากพารามิเตอร์ซึ่งได้จากการจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการศึกษาพบว่า ผลการคำนวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การจัดเรียงทั้ง 4 รูปแบบให้กำลังผลิตเท่ากันในแต่ละรูปแบบการบังเงา เทคนิคที่เสนอสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าทางทฤษฎี ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง พิลล์แฟคเตอร์ ประสิทธิภาพ และกำลังผลิตได้ และลดความสูญเสียจากการไม่เข้ากันลงได้ โดยสามารถเพิ่มกำลังผลิตได้ 3 จาก 4 รูปแบบการบังเงา คือ รูปแบบการบังเงาแบบ SN LW และ SW คิดเป็นร้อยละ 4.29 18.63 และ 22.09 ตามลำดับ

คำสำคัญ: อาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ การบังเงาบางส่วน การจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่ การปรับปรุงซูโดกุ

Abstract

This paper presents the performance enhancement of the PV module array, 10W-rated module, and 5X5 array under partial shade conditions in 4 configurations: Short Wide--SW, Short Narrow--SN, Long Wide--LW, and Long Narrow--LN, which use a Physical Relocation of Module with Fixed Electrical Connections--PRM-FEC, are examples of these configurations. Four configurations of modified Sudoku techniques were evaluated by calculating the theoretical power and the performance based on the parameters obtained from the MATLAB/Simulink simulation program. The results showed that the results of the calculation tended in the same direction. The four arrangements provided the same power output in each shading pattern. The proposed technique could increase theoretical power (Global Maximum Power Point--GMPP), Fill Factor--FF, efficiency-- η , Enhancement Power--EP, and decrease Mismatch Losses--ML. The output power could be increased by 3 of 4 shading patterns. 4.29%, 18.63%, and 22.09% for the SN LW and SW shading patterns, respectively.

Keywords: PV array, partial shading, relocation of module, modified Sudoku



บทนำ

ปัจจุบันโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ในขณะที่ราคาโมดูลต่ำลง ส่งผลให้มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งแบบอิสระ แบบเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า และแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียน ช่วยลดการใช้พลังงานฟอสซิลและลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงเช่นกัน ซึ่งการบังเงาบางส่วน (partial shading) เป็นหนึ่งในปัญหาที่ทำให้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพต่ำลง และเปลี่ยนแปลงเส้นโค้งคุณลักษณะ $I-V$ และ $P-V$ ของโมดูล (Tatabhatla, Agarwal & Kanumuri, 2020) การจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าคงเดิม (Physical Relocation of Module with Fixed Electrical Connections--PRM-FEC) เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วน โดยเฉพาะอาร์เรย์ที่เชื่อมโยงแบบ TCT--Total Cross Tied และแบบ SP--Series Parallel วิธีนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความสูญเสียจากการไม่เข้ากัน และเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอาร์เรย์โมดูลภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนได้

(Rezazadeh et al., 2022; Namhormchan, 2021)

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วนของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่ ได้แก่ Madhanmohan, Nandakumar and Saleem (2020) นำเสนอการเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนโดยใช้การจัดเรียงการกระจายตามแนวทแยงมุม (D-TCT) ทำการศึกษาโดยใช้โมดูล พิกัด 20 วัตต์ อาร์เรย์ขนาด 4X4 เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วน 9 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ TCT Std.--Standard Total-Cross-Tied โดยเทคนิคที่นำเสนอจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยนำโมดูลในแถวที่ 1 (11 12 13 และ 14) กระจายในแนวทแยงมุมลงโดยคงที่ตำแหน่งโมดูล 11 ไว้ที่ตำแหน่งเดิม โมดูล 12 ย้ายไปแทนที่ตำแหน่งของโมดูล 22 โมดูล 13 ย้ายไปแทนที่ตำแหน่งของโมดูล 33 และโมดูล 14 ย้ายไปแทนที่ตำแหน่งของโมดูล 44 ซึ่งการจัดเรียงตำแหน่งใหม่ในแนวทแยงมุมและตำแหน่งของโมดูลที่เหลือจะทำการจัดเรียงตำแหน่งภายในคอลัมน์ เทคนิคที่เสนอสามารถเพิ่มกำลังผลิตของอาร์เรย์โมดูลได้ 5 จาก 9 รูปแบบการบังเงาที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดเรียงแบบ TCT Std. Nahidan, Niroomand and Dehkordi (2021) นำเสนอการเพิ่ม

กำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์โมดูลภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนโดยใช้การจัดเรียงตำแหน่งอาร์เรย์ที่เหมาะสม 2 ขั้นตอน ทำการศึกษาโดยใช้โมดูล พิกัด 83.23 วัตต์ อาร์เรย์ขนาด 10X10 เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วน 8 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ TCT Std. โดยเทคนิคที่นำเสนอจะทำการแบ่งอาร์เรย์ขนาด 10X10 ออกเป็นอาร์เรย์ย่อยขนาด 5X5 จำนวน 4 อาร์เรย์ ซึ่งแต่ละอาร์เรย์ย่อยจะคงตำแหน่งของโมดูลในคอลัมน์แรกไว้ แล้วทำการจัดเรียงตำแหน่งใหม่ภายในคอลัมน์ที่เหลือเพื่อกระจายรูปแบบการบังเงาบางส่วน ผลจากการจำลองพบว่า เทคนิคที่นำเสนอสามารถลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วนและเพิ่มกำลังผลิตของอาร์เรย์โมดูลได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 36.41 สำหรับการบังเงาที่ศึกษา Rajani and Ramesh (2021) นำเสนอการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์โมดูลภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนโดยใช้เทคนิคการจัดเรียงการปรับปรุงชุดการศึกษาโดยใช้โมดูล พิกัด 200.143 วัตต์ อาร์เรย์ขนาด 9X9 เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วน 7 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ TCT Std. โดยเทคนิคที่นำเสนอได้เลือกปริศนาชุดิกามา 1 รูปแบบ และได้เติมตัวเลข 1-9 ลงในช่องว่างตามกติกาของซูโดกุ คือ ตัวเลขจะไม่ซ้ำกันทั้งในแถว คอลัมน์ และตารางย่อยขนาด 3X3 แล้วทำการปรับปรุงชุดิกที่ได้โดยการเพิ่มตัวเลขให้เป็น 2 หลัก สอดคล้องกับตำแหน่งของโมดูลในอาร์เรย์ $m \times n$ การจัดเรียงตำแหน่งของเทคนิคนี้จะเป็นการจัดเรียงตำแหน่งในแต่ละคอลัมน์ เพื่อกระจายรูปแบบการบังเงาบางส่วน เทคนิคที่เสนอสามารถเพิ่มกำลังผลิตของอาร์เรย์โมดูลได้ถึงร้อยละ 0.68-25.74 ในรูปแบบการบังเงาที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดเรียงแบบ TCT Std. Ye, Tai, Huang and Chen, (2021) นำเสนอการกระจายผลกระทบการบังเงาบางส่วนและการลดกำลังสูญเสียในอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การเสริมชุดิกทำการศึกษาโดยใช้โมดูล พิกัด 79.2 วัตต์ อาร์เรย์ขนาด 6X6 เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วน 6 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ TCT Std. โดยเทคนิคที่นำเสนอจะทำการแบ่งอาร์เรย์ขนาด 6X6 ออกเป็นอาร์เรย์ย่อยขนาด 2X3 จำนวน 6 อาร์เรย์ ซึ่งจะคงตำแหน่งของโมดูลในคอลัมน์แรกไว้ แล้วทำการจัดเรียงตำแหน่งภายในคอลัมน์ที่เหลือโดยใช้เทคนิคชุดิกและข้อกำหนดที่เพิ่มเติมขึ้นมา เพื่อกระจายรูปแบบการบังเงาบางส่วน ผลจากการจำลองพบว่า เทคนิคที่นำเสนอสามารถลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วนได้ สามารถเพิ่มกำลังผลิต

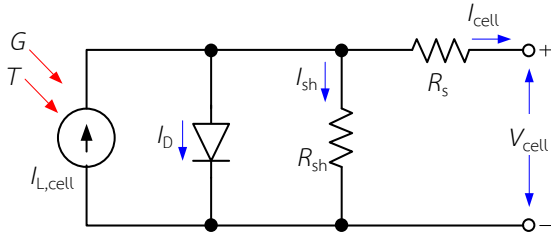
ของอาร์เรย์โมดูลและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ทุกรูปแบบการบังเงาที่ศึกษา โดยสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าได้เฉลี่ยร้อยละ 14.60 Rezazadeh, Moradzadeh, Pourhossein, Mohammadi-Ivatloo and García Márquez (2022) นำเสนอการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์โมดูลภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนโดยใช้เทคนิคการจัดเรียงการเดินของม้าหมากรุก ทำการศึกษาโดยใช้โมดูล พิกัด 213.15 วัตต์ อาร์เรย์ขนาด 9X9 เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ TCT Std. การจัดเรียงโดยใช้ชุดิก และการจัดเรียงโดยใช้ปริศนาดีกระฟ้า ผลการจำลองพบว่า เทคนิคที่นำเสนอส่งผลให้ฟิลแพคเตอร์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพสูงขึ้น และความสูญเสียจากการไม่เข้ากันลดลงในทุกกรณีการบังเงาบางส่วนที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดเรียงแบบ TCT เป็นต้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 10 วัตต์ อาร์เรย์ขนาด 5X5 ร่วมกับการจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่ โดยปรับปรุงจากชุดิก 5X5 แบบกากบาท ซึ่งจะกำหนดค่าเริ่มต้นของชุดิกในแนวทแยงมุมของอาร์เรย์ ทำการจัดเรียงตำแหน่งโมดูลใหม่ภายในคอลัมน์ จำนวน 4 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการจัดเรียงอาร์เรย์แบบปกติ (TCT Std.) การบังเงาบางส่วน จำนวน 4 รูปแบบ ดังนี้ Short Wide--SW Short Narrow--SN Long Wide--LW และ Long Narrow--LN คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎีและจำลองหาพารามิเตอร์สำหรับประเมินสมรรถนะด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

อาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

แบบจำลองไดโอดเดี่ยวของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส ไดโอด ตัวต้านทานขนาน (R_{sh}) และตัวต้านทานอนุกรม (R_s) โดยที่ไดโอดและตัวต้านทานขนานต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแส ไดโอดแสดงคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของรอยต่อพี-เอ็น ตัวต้านทานขนานแสดงกระแสรั่วไหล และตัวต้านทานอนุกรมแสดงถึงความสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า แสดงดังภาพ 1



ภาพ 1 แบบจำลองไดโอดเดี่ยวของวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

Note. Adapted From “Maximum power enhancement under partial shadings using a modified Sudoku reconfiguration”, by K. Rajani, & T. Ramesh, 2021, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(6), pp. 1187-1201. Copyright 2021 by Chinese Society for Electrical Engineering

จากภาพ 1 กระแสไฟฟ้าที่ชั่วจากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้ดังสมการ (1)

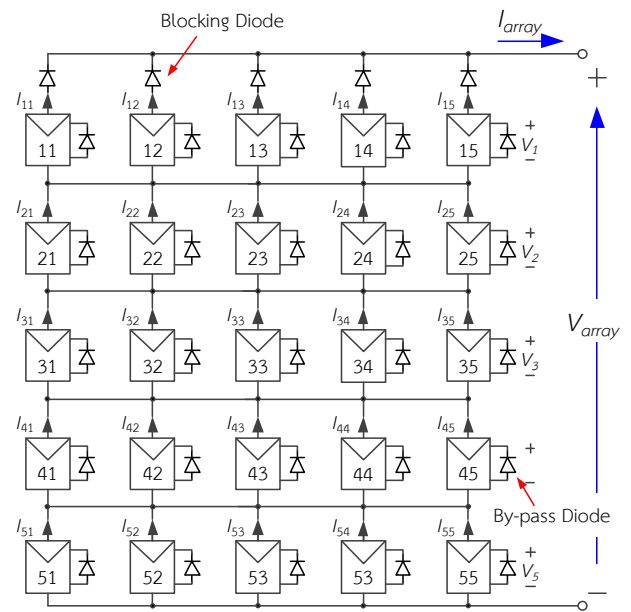
$$I_{cell} = I_{L,cell} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

เมื่อ I_{cell} คือ กระแสที่ชั่วของเซลล์แสงอาทิตย์ $I_{L,cell}$ คือ กระแสที่สร้างขึ้นจากรังสีอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ I_D คือ กระแสของไดโอด I_{sh} คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานขนาน โดยที่กระแสที่ชั่วของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติแสดงดังสมการ (2)

$$I_{cell} = I_{L,cell} - I_D e^{\frac{(V_{cell} + R_s I_{cell})}{V_T a} - 1} - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (2)$$

เมื่อ I_D คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด (A) I_{cell} คือ กระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ (A) R_{sh} และ R_s คือ ตัวต้านทานขนานและอนุกรม (Ω) V_{cell} คือ แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ (V) $V_T = (kT)/q$ คือ แรงดันที่เกิดจากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ k คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (1.3806×10^{-23} J/K) T คือ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (K) a คือ แฟกเตอร์ในอุดมคติ q คือ ประจุของอิเล็กตรอน (1.602×10^{-19} C) (Rajani & Ramesh, 2021)

การเชื่อมต่อโมดูลแบบ TCT ขนาด 5X5 แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 การเชื่อมต่ออาร์เรย์โมดูลแบบ TCT

Note. Adapted From “Maximum power enhancement under partial shadings using a modified Sudoku reconfiguration”, by K. Rajani, & T. Ramesh, 2021, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(6), pp. 1187-1201. Copyright 2021 by Chinese Society for Electrical Engineering

การเชื่อมต่ออาร์เรย์แบบ TCT เป็นการเชื่อมต่อร่วมกันทั้งแบบอนุกรมและขนาน ช่วยลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วนได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมต่อรูปแบบอื่น ๆ กำลังไฟฟ้าขาออกของอาร์เรย์สัมพันธ์กับผลรวมของกระแสแต่ละแถว ตัวอย่างอาร์เรย์ 5X5 พิกัดกระแสแถวหาได้จากสมการ

$$I_{Rn} = \sum_{n=1}^5 g_{1n} \times I_{1n} \quad (3)$$

เมื่อ I_{1n} คือ กระแสที่รังสีอาทิตย์ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) (G_0) G_{1n} คือ ระดับรังสีอาทิตย์ที่โมดูลได้รับ (n คือ ดัชนีคอลัมน์) และ $g_{1n} = G_{1n}/G_0$ ตัวอย่างเช่น กระแสขาออกของอาร์เรย์แถวที่ i^{th} ประกอบไปด้วย 5 โมดูล ได้รับรังสีอาทิตย์ ดังนี้ $300 W/m^2$ จำนวน 2 โมดูล $1,000 W/m^2$ จำนวน 3 โมดูล จะได้ $(2 \times 0.3)/5 + 3/5 = 3.6/5$ แรงดันขาออกของอาร์เรย์จะหาได้จากผลรวมของแรงดันแต่ละแถว ตัวอย่างอาร์เรย์ 5X5 พิกัดแรงดันหาได้จากสมการ (4)

$$V_{array} = \sum_{i=1}^5 V_i \quad (4)$$

เมื่อ V_{array} คือ แรงดันขาออกของอาร์เรย์ และ V_i คือ แรงดันอาร์เรย์สูงสุดของแถวที่ i^{th} กระแสที่โนดใด ๆ ในอาร์เรย์หาได้โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ และผลรวมของกระแสอาร์เรย์ (I_{array}) ตัวอย่างอาร์เรย์ 5X5 หาได้จากสมการ (5) (Nihanth et al., 2019)

$$I_{array} = \sum_{j=1}^5 I_j - I_{(i+1)j} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (5)$$

จากสมการ (3)–(5) จะพบว่า ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนกระแสขาออกแต่ละแถวจะไม่เท่ากัน ดังนั้นจะมีจุดกำลังไฟฟ้าสูงหลายจุดในเส้นโค้งคุณลักษณะ $P-V$ ซึ่งตำแหน่งของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง (GMPP) จะถูกกำหนดโดยผลคูณของแรงดันและกระแสที่สูงที่สุด แรงดันไฟฟ้าในแต่ละแถวจะกำหนดให้มีค่าเท่ากันโดยละทิ้งแรงดันไฟฟ้าตก ตัวอย่างเช่น แรงดันไฟฟ้าขาออกของอาร์เรย์ 5X5 คือ $5V_m$ กำลังไฟฟ้าขาออกของอาร์เรย์ จะหาได้จากสมการ (6) (Rajani & Ramesh, 2021)

$$P_o = V_o I_m = 5V_m I_m \quad (6)$$

ตัวอย่างเช่น กำลังไฟฟ้าขาออกของอาร์เรย์ 5X5 กรณีไม่มีการบังเงาบางส่วน คือ $5V \times 5I_m = 25V I_m$ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและพื้นที่ แสดงดังตาราง 1

ซูโดกุ

ซูโดกุ (Sudoku) เป็นเกมปริศนาตัวเลข เผยแพร่ในสหรัฐอเมริกาครั้งแรกในชื่อว่า Number Place เมื่อ พ.ศ. 2522 และปรากฏในญี่ปุ่นใน 5 ปีต่อมา ซูโดกุ (数独) ย่อมาจาก ซูจิจะโดกุชินนิกายิรุ (数字は独身に限る) หมายความว่า ตัวเลขต้องมีเพียงเลขเดียว ผู้เล่นซูโดกุจะต้องเติมตัวเลข 1 ถึง 9 ลงในตารางขนาด 9X9 โดยที่ตัวเลขจะต้องไม่ซ้ำกันในแต่ละแถว แต่ละคอลัมน์ และแต่ละตารางย่อยขนาด 3X3 (Mishra, Mishra, Das & Acharya, 2018) นอกจากซูโดกุแบบมาตรฐานขนาด 9X9 แล้ว ยังมีขนาด 4X4 5X5 6X6 12X12 16X16 และ 25X25 เป็นต้น อีกด้วย

ตาราง 1

คุณสมบัติของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษา

Polycrystalline Solar Panel VP-SP-10Wp	
STC (1000 W/m ² , 25 °C)	
Area 0.08225 m ²	
Out Peak Power (P_m)	10 W
Maximum Power Voltage (V_{mp})	18 V
Maximum Power Current (I_{mp})	0.56 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22.4 V
Shot Circuit Current (I_{sc})	0.67 A

1				
	2			
		3		
			4	
				5

(a)

1	4	5	3	2
3	2	4	5	1
2	5	3	1	4
5	1	2	4	3
4	3	1	2	5

(b)

11	42	53	34	25
31	22	43	54	15
21	52	33	14	45
51	12	23	44	35
41	32	13	24	55

(c)

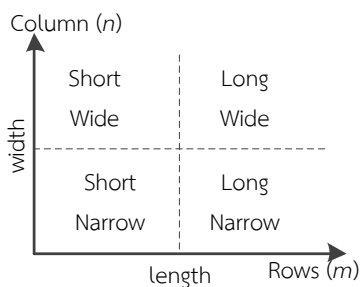
ภาพ 3 ซูโดกุ 5X5 แบบกากบาท (a) กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (b) ซูโดกุที่สมบูรณ์ (c) ปรับปรุงจาก 3(b) จัดเรียงตำแหน่งในคอลัมน์

ซูโดกุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 5X5 โดยมีตารางย่อยจำนวน 5 ตาราง ตารางละ 5 ช่อง ซึ่งตารางย่อยตรงกลางเป็นรูปกากบาท โดยที่ตัวเลข 1 ถึง 5 ในแต่ละแถว แต่ละคอลัมน์ และแต่ละตารางย่อยต้องไม่ซ้ำกัน ตัวอย่างซูโดกุขนาด 5X5 แบบกากบาท ซึ่งกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้หมายเลข 1-5 อยู่ในแนวทแยงของตารางแสดงดังภาพ 3(a) การเติมตัวเลขลงในช่องว่างต่าง ๆ จะอาศัยกติกาของซูโดกุ ซูโดกุที่สมบูรณ์จากภาพ 3(a) แสดงดังภาพ 3(b) สำหรับภาพ 3(c) แสดงการปรับปรุงซูโดกุจากภาพ 3(b) โดยการเพิ่มตัวเลขในหลักที่ 2 ของทุกช่องสอดคล้องกับ

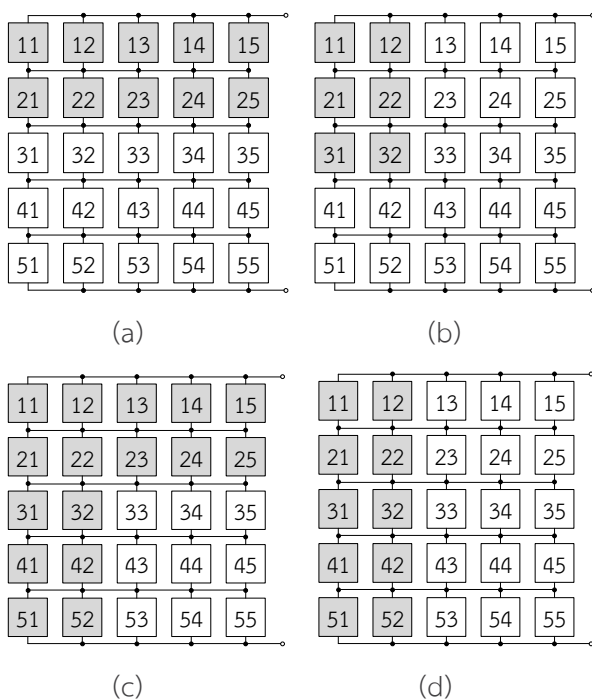
ตำแหน่งของโมดูล $m \times n$ โดยตัวเลขหลักที่ 1 แสดงถึงลำดับของแถว และตัวเลขหลักที่ 2 แสดงถึงลำดับของคอลัมน์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการจัดเรียงตำแหน่งภายในแต่ละคอลัมน์ของอาร์เรย์

รูปแบบการบังเงาบางส่วน

ผลกระทบจากเงื่อนไขการบังเงาบางส่วนศึกษาจากจำนวนคอลัมน์ (ความกว้าง) และจำนวนแถว (ความยาว) ของอาร์เรย์โมดูล (Namhormchan, 2021) แสดงดังภาพ 4 รูปแบบการบังเงาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 4 รูปแบบ ดังนี้ (1) SW (2) SN (3) LW และ (4) LN ตัวอย่างการบังเงาบางส่วนของอาร์เรย์ที่มีการเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT และการจัดเรียงแบบ TCT Std. แสดงดังภาพ 5



ภาพ 4 รูปแบบเงื่อนไขการบังเงาบางส่วน



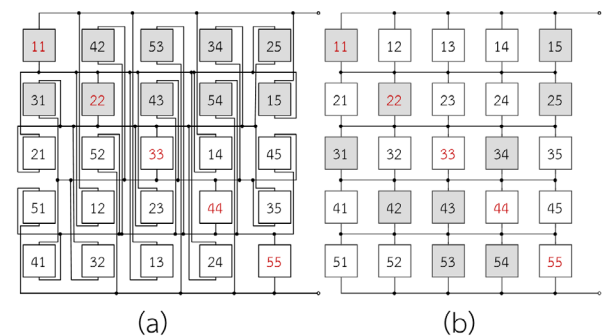
ภาพ 5 การบังเงา (a) SW (b) SN (c) LW (d) LN

การจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าคงเดิม (PRM-FEC)

วัตถุประสงค์หลักของการจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าคงเดิม คือ กระจายรูปแบบการบังเงาบางส่วน เพื่อลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วนของอาร์เรย์โมดูล โดยการจัดเรียงตำแหน่งทางกายภาพของโมดูลใหม่ภายในอาร์เรย์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Sahu & Nayak, 2013)

ตัวอย่างการจัดเรียงอาร์เรย์ตามรูป 3(c) ซึ่งเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT กรณีการบังเงาบางส่วนแบบ SW ตามรูป 5(a) แสดงดังภาพ 6(a) และการกระจายรูปแบบการบังเงาบางส่วนแสดงดังภาพ 6(b)

การจัดเรียงโมดูลโดยใช้ชุด 5x5 แบบกากบาทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 4 รูปแบบ โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นทแยงมุมลง 2 รูปแบบ ทแยงมุมขึ้น 2 รูปแบบ ทำการปรับปรุงชุดกฎที่ได้โดยจัดเรียงตำแหน่งใหม่ในคอลัมน์ แสดงดังภาพ 7



ภาพ 6 การเชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วนแบบ SW (a) การจัดเรียงโดยใช้ชุด 5x5 แบบกากบาทตามภาพ 3(c) (b) การกระจายการบังเงาบางส่วนของภาพ 6(a)

การประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูล

พารามิเตอร์สำหรับประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน ในงานวิจัยนี้ได้แก่ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง (Global Maximum Power Point--GMPP) ความสูญเสียจากการไม่เข้ากัน (Mismatch Losses--ML) ฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor--FF) ประสิทธิภาพ (η) และกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (Enhancement Power--EP) (Krishna & Moger, 2019)

1	4	5	3	2
3	2	4	5	1
2	5	3	1	4
5	1	2	4	3
4	3	1	2	5

(a)

11	42	53	34	25
31	22	43	54	15
21	52	33	14	45
51	12	23	44	35
41	32	13	24	55

(b)

1	5	4	3	2
3	2	1	5	4
5	4	3	2	1
2	1	5	4	3
4	3	2	1	5

(c)

11	52	43	34	25
31	22	13	54	45
51	42	33	24	15
21	12	53	44	35
41	32	23	14	55

(d)

2	4	1	3	5
3	5	2	4	1
4	1	3	5	2
5	2	4	1	3
1	3	5	2	4

(e)

21	42	13	34	55
31	52	23	44	15
41	12	33	54	25
51	22	43	14	35
11	32	53	24	45

(f)

2	1	4	3	5
3	5	1	4	2
5	4	3	2	1
4	2	5	1	3
1	3	2	5	4

(g)

21	12	43	34	55
31	52	13	44	25
51	42	33	24	15
41	22	53	14	35
11	32	23	54	45

(h)

ภาพ 7 ซูโดกุ 5X5 แบบกากบาท (a) เงื่อนไขเริ่มต้นทแยงมุมลง รูปแบบที่ 1 (b) ปรับปรุงจาก 7(a) (SD_D1) (c) เงื่อนไขเริ่มต้นทแยงมุมลง รูปแบบที่ 2 (d) ปรับปรุงจาก 7(c) (SD_D2) (e) เงื่อนไขเริ่มต้นทแยงมุมขึ้น รูปแบบที่ 1 (f) ปรับปรุงจาก 7(e) (SD_U1) (g) เงื่อนไขเริ่มต้นทแยงมุมขึ้น รูปแบบที่ 2 (h) ปรับปรุงจาก 7(g) (SD_U2)

ฟิลล์แพคเตอร์สัมพันธ์กับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง (GMPP) และกำลังไฟฟ้าทางทฤษฎีได้จากผลคูณของแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และกระแสลัดวงจร (I_{sc}) FF หาได้จากสมการ (7)

$$FF (\%) = \frac{Power \text{ at } GMPP}{V_{oc} I_{sc}} \times 100 \quad (7)$$

ความสูญเสียจากการไม่เข้ากัน คือ ความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้รังสีอาทิตย์แบบสม่ำเสมอ (MPP_{uni}) และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงภายใต้การบังเงาบางส่วน (MPP_{PSCs}) ML หาได้จากสมการ (8)

$$ML (\%) = \frac{MPP_{uni} - MPP_{PSCs}}{MPP_{PSCs}} \times 100 \quad (8)$$

= ประสิทธิภาพ คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและพลังงานแสงอาทิตย์ขาเข้าของอาร์เรย์โมดูล η หาได้จากสมการ (9)

$$Efficiency (\eta) = \frac{Power \text{ at } GMPP}{P_{in}} \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ P_{in} คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ หาได้จากความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และพื้นที่ของอาร์เรย์โมดูล (m^2)

กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น หาได้จากการเปรียบเทียบ GMPP ระหว่างการจัดเรียงรูปแบบที่นำเสนอเปรียบเทียบกับและ TCT Std. แสดงดังสมการ (10)

$$EP (\%) = \frac{GMPP_{SD_n} - GMPP_{TCT \text{ Std.}}}{GMPP_{TCT \text{ Std.}}} \times 100 \quad (10)$$

บล็อกไดอะแกรมสำหรับจำลองหาพารามิเตอร์ ได้แก่ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง (GMPP) แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) ของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink (Bala Raju & Chengaiah, 2019; Namhormchan, 2021) แสดงดังภาพ 8 โมดูลที่ถูกบังเงาจะกำหนดให้ได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ 300 W/m^2 และโมดูลที่ไม่ถูกบังเงาจะกำหนดให้ได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ ที่อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส ตัวอย่างการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ TCT Std. การบังเงาบางส่วนแบบ SW แสดงดังภาพ 9

การวิจัยนี้กำหนดให้ผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางทฤษฎี (Theoretical maximum power-- P_o) และผลการจำลองหาพารามิเตอร์สำหรับประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้แก่ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง (Global Maximum Power Point--GMPP) ความสูญเสียจากการไม่เข้ากัน (Mismatch Losses--ML) ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor--FF) ประสิทธิภาพ (η) และกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (Enhancement Power--EP) เป็นตัวแปรตาม ซึ่งมีกรอบแนวคิดการวิจัยแสดงดังภาพ 10 ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน โดยกำหนดให้การจัดเรียงตำแหน่งใหม่ของโมดูลโดยใช้การปรับปรุงชุด 5X5 จำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) SD_D1 (2) SD_D2 (3) SD_U1 และ (4) SD_U2 และการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) SW (2) SN (3) LW และ (4) LN เป็นตัวแปรต้น

สมมติฐานการวิจัย

รูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และรูปแบบการบังเงาบางส่วนมีผลต่อสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 5X5 โดยใช้พารามิเตอร์ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ พิกัด 10 วัตต์ ดังตาราง 1 เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT ดังภาพ 2 โมดูลที่ไม่มีเงาบังได้ รับความเข้มรังสีอาทิตย์ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และโมดูลที่มีเงาบังจะได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ 300 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) SW (2) SN (3) LW และ (4) LN ดังภาพ 5

การจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลโดยใช้การปรับปรุงชุด 5X5 แบบกากบาท กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นตามแนวทแยงมุมลงและขึ้น ปรับปรุงชุดโดยจัดเรียงตำแหน่งภายในคอลัมน์ จำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) SD_D1 (2) SD_D2 (3) SD_U1 และ (4) SD_U2 ดังภาพ 7 เปรียบเทียบกับการจัดเรียงแบบ TCT Std.

ประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์โดยการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี (P_o) โดยใช้สมการ (3)-(6) จำลองหาพารามิเตอร์สำหรับประเมินสมรรถนะบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้แก่ GMPP V_{oc} และ I_{sc} และประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลโดยใช้สมการ (7)-(10) ได้แก่ ML FF η และ EP

ผลการวิจัย

กรณีที่ 1 การบังเงา SW

อาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 บังเงาบางส่วนแบบ SW และการกระจายรูปแบบเงาแสดงดังภาพ 11 ภาพ 11(a) แสดงการจัดเรียงแบบ SD_D1 บังเงาบางส่วนแบบ SW ซึ่งเป็นการบังเงาทั้งแถวจำนวน 2 แถว และการกระจายรูปแบบการบังเงาจากภาพ 11(a) แสดงดังภาพ 11(b) จะพบว่า การบังเงาจะถูกกระจายออกเป็น แถวละ 2 โมดูล จำนวน 5 แถว ตัวอย่างการคำนวณกระแสแถวขาออกของอาร์เรย์ แสดงดังสมการ (11)-(12)

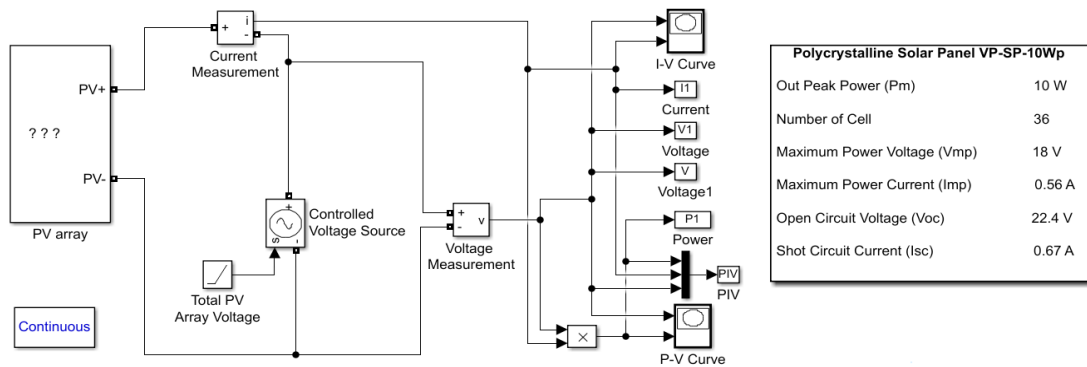
$$I_{R1} = 0.3I_m + I_m + I_m + I_m + 0.3I_m = 3.6I_m \quad (11)$$

$$I_{R2} = I_{R3} = I_{R4} = I_{R5} = I_{R1} = 3.6I_m \quad (12)$$

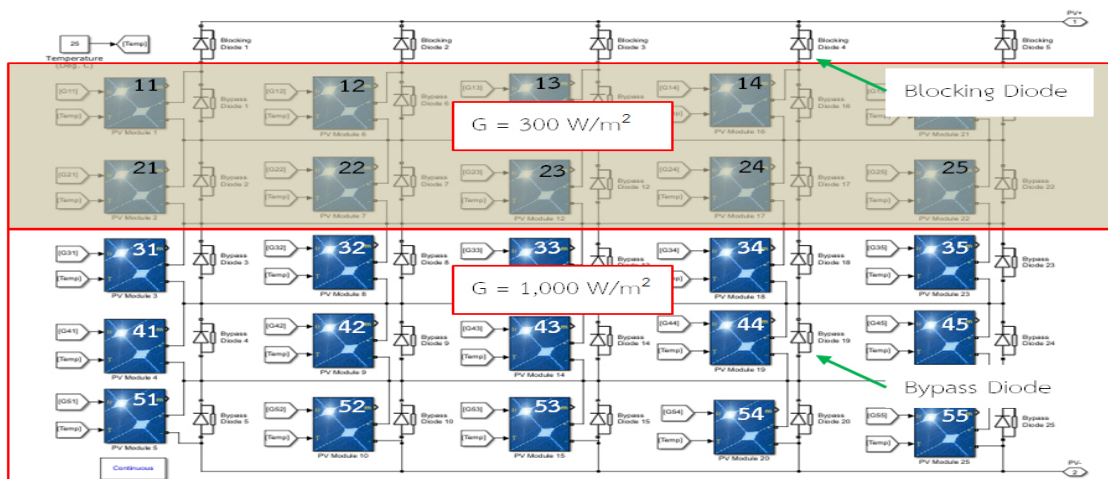
ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ SW แสดงดังตาราง 2 และภาพ 12

กรณีที่ 2 การบังเงา SN

อาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 บังเงาบางส่วนแบบ SN และการกระจายรูปแบบเงาแสดงดังภาพ 13 ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ SN แสดงดังตาราง 3 และภาพ 14

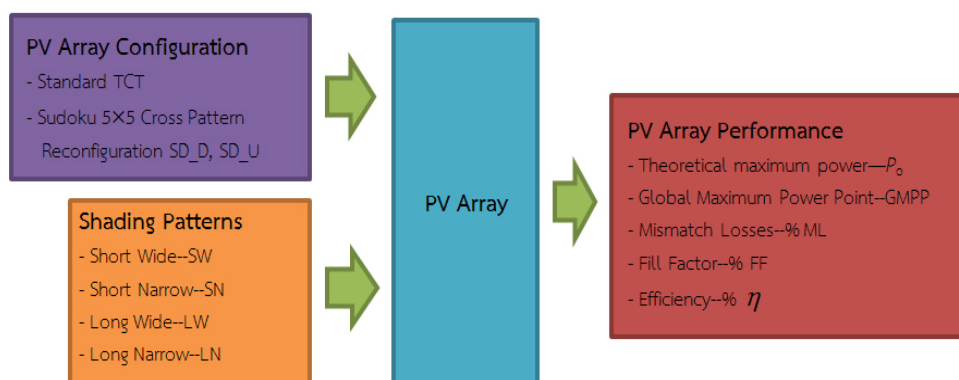


ภาพ 8 บล็อกไดอะแกรมสำหรับหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพ 9 ตัวอย่างการจัดเรียงอาร์เรย์แบบ TCT Std. เชื่อมโยงอาร์เรย์แบบ TCT การบังเงาบางส่วนแบบ SW อุณหภูมิโมดูล 25 องศาเซลเซียส บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพ 10 กรอบแนวคิดการวิจัย

กรณีที่ 3 การบังเงา LW

อาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 บังเงาบางส่วนแบบ LW และการกระจายรูปแบบเงาแสดงดังภาพ 15 ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ LW แสดงดังตาราง 4 และภาพ 16

กรณีที่ 4 การบังเงา LN

อาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 บังเงาบางส่วนแบบ LN และการกระจายรูปแบบเงาแสดงดังภาพ 17 ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ LN แสดงดังตาราง 5 และภาพ 18

11	42	53	34	25
31	22	43	54	15
21	52	33	14	45
51	12	23	44	35
41	32	13	24	55

(a) SD_D1

11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35
41	42	43	44	45
51	52	53	54	55

(b) SD_D1 Dispersion

11	52	43	34	25
31	22	13	54	45
51	42	33	24	15
21	12	53	44	35
41	32	23	14	55

(c) SD_D2

11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35
41	42	43	44	45
51	52	53	54	55

(d) SD_D2 Dispersion

21	42	13	34	55
31	52	23	44	15
41	12	33	54	25
51	22	43	14	35
11	32	53	24	45

(e) SD_U1

11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35
41	42	43	44	45
51	52	53	54	55

(f) SD_U1 Dispersion

21	12	43	34	55
31	52	13	44	25
51	42	33	24	15
41	22	53	14	35
11	32	23	54	45

(g) SD_U2

11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35
41	42	43	44	45
51	52	53	54	55

(h) SD_U2 Dispersion

ภาพ 11 การบังเงาบางส่วนแบบ SW บนอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 และการกระจายรูปแบบเงา

ตาราง 2

ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ SW

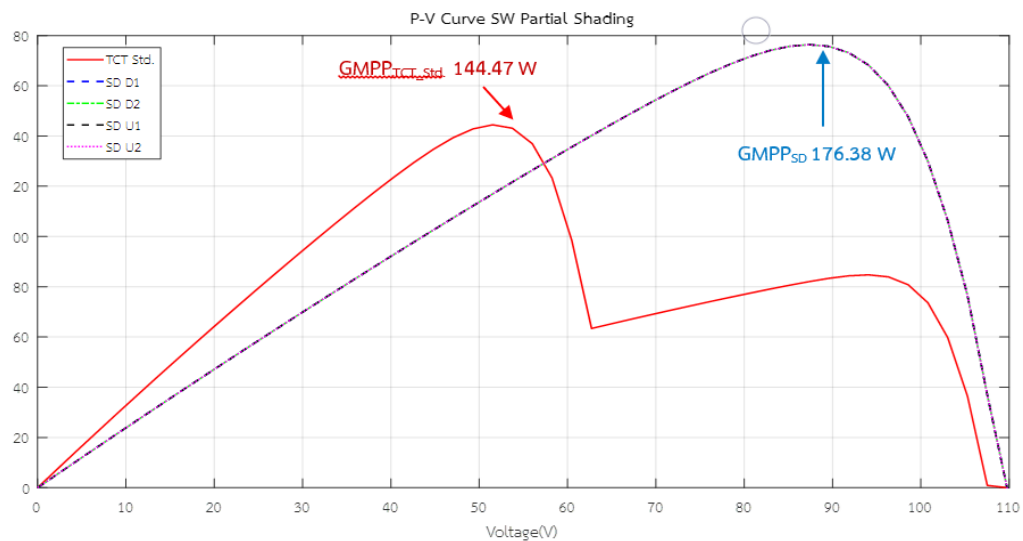
Calculation											
TST Std.	SD_D1						SD_D2				
Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o
I_{R1}	$1.5I_m$	$5V_m$	$7.5V I_{m,m}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{m,m}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{m,m}$
I_{R2}	$1.5I_m$	$4V_m$	$6V I_{m,m}$	I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{m,m}$	I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{m,m}$
I_{R3}	$5I_m$	$3V_m$	$15V I_{m,m}$	I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{m,m}$	I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{m,m}$
I_{R4}	$5I_m$	$2V_m$	$10V I_{m,m}$	I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V I_{m,m}$	I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V I_{m,m}$
I_{R5}	$5I_m$	V_m	$5V I_{m,m}$	I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V I_{m,m}$	I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V I_{m,m}$

ตาราง 2 (ต่อ)

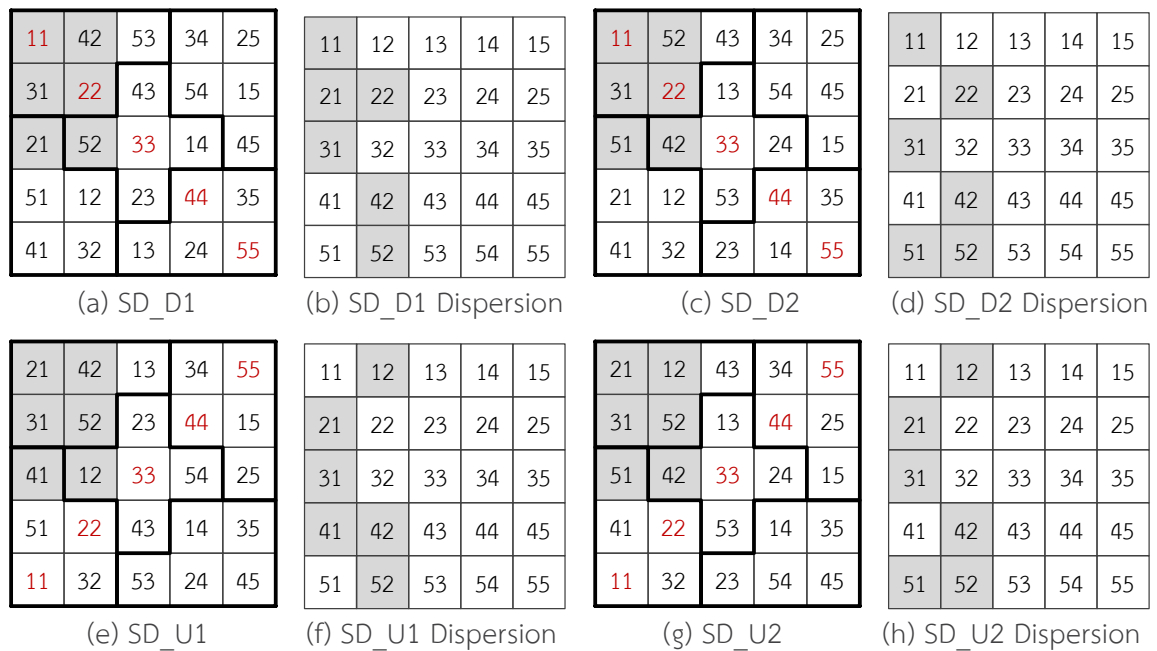
SD_U1				SD_U2			
Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o
I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V_m I_m$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V_m I_m$
I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V_m I_m$	I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V_m I_m$
I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V_m I_m$	I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V_m I_m$
I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V_m I_m$	I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V_m I_m$
I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V_m I_m$	I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V_m I_m$

Simulation

Configuration	I_{sc}	V_{oc}	GMPP	I_{mpp}	V_{mpp}	% FF	% ML	% η	% EP
TST Std.	3.35	107.57	144.47	2.80	51.52	40.09	72.87	9.76	-
SD_D1	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	22.09
SD_D2	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	22.09
SD_U1	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	22.09
SD_U2	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	22.09



ภาพ 12 เส้นโค้งคุณลักษณะ P-V ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 การบังเงาแบบ SW



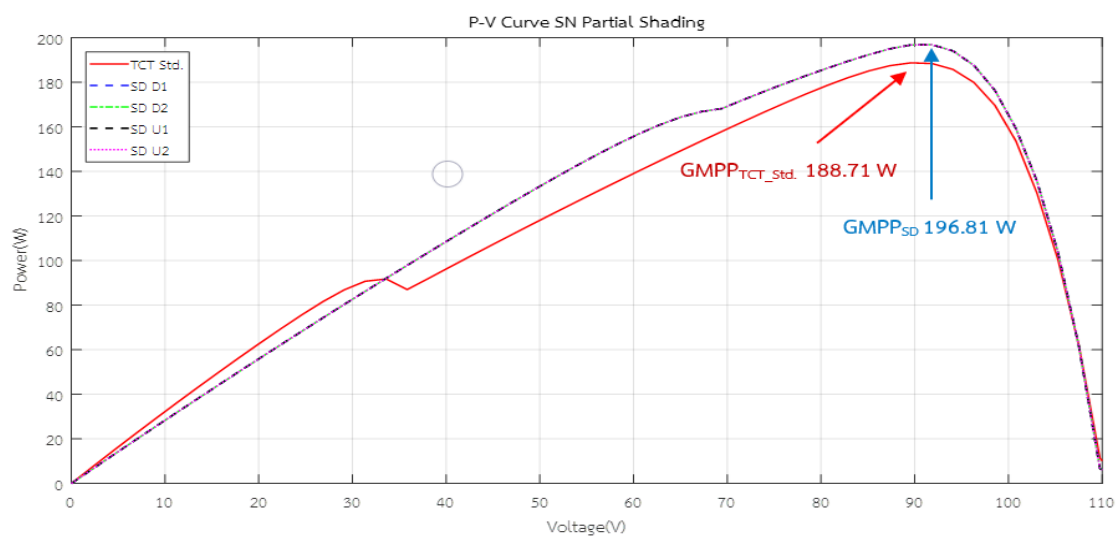
ภาพ 13 การบังเงาบางส่วนแบบ SN บนอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 และการกระจายรูปแบบเงาตาราง 3

ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ SN

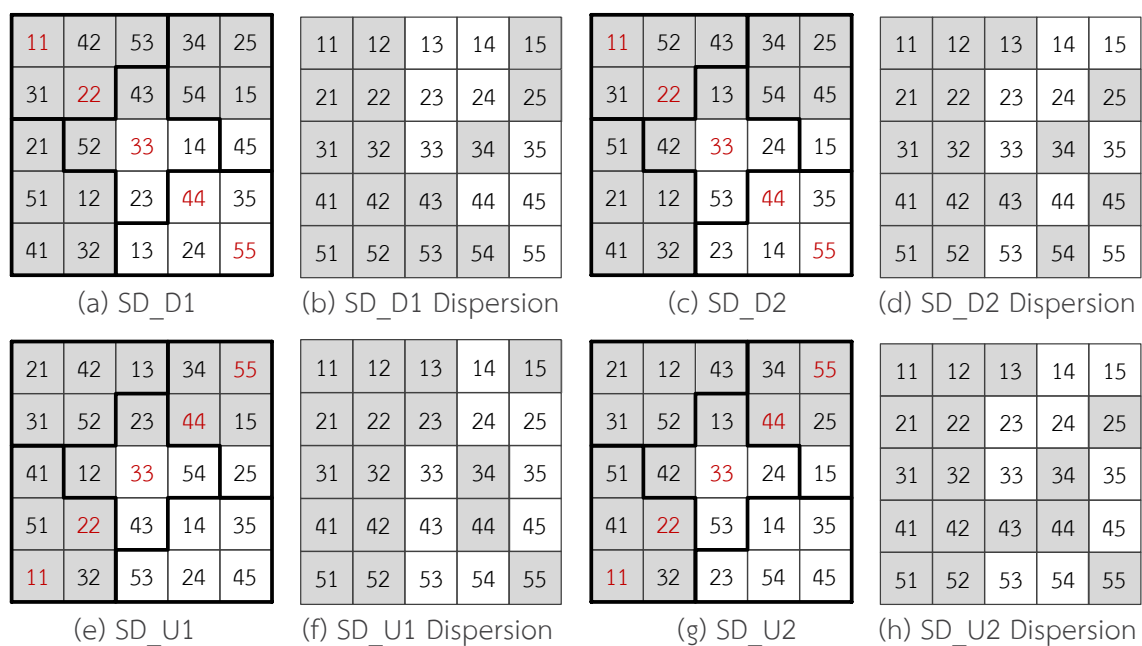
Calculation											
TST Std.				SD_D1				SD_D2			
Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o
I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{m m}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{m m}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{m m}$
I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{m m}$	I_{R2}	$4.3I_m$	$4V_m$	$17.2V I_{m m}$	I_{R2}	$4.3I_m$	$4V_m$	$17.2V I_{m m}$
I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{m m}$	I_{R3}	$4.3I_m$	$3V_m$	$12.9V I_{m m}$	I_{R3}	$4.3I_m$	$3V_m$	$12.9V I_{m m}$
I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$10V I_{m m}$	I_{R4}	$4.3I_m$	$2V_m$	$8.6V I_{m m}$	I_{R4}	$4.3I_m$	$2V_m$	$8.6V I_{m m}$
I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$5V I_{m m}$	I_{R5}	$4.3I_m$	V_m	$4.3V I_{m m}$	I_{R5}	$4.3I_m$	V_m	$4.3V I_{m m}$
SD_U1				SD_U2							
Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o				
I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{m m}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{m m}$				
I_{R2}	$4.3I_m$	$4V_m$	$17.2V I_{m m}$	I_{R2}	$4.3I_m$	$4V_m$	$17.2V I_{m m}$				
I_{R3}	$4.3I_m$	$3V_m$	$12.9V I_{m m}$	I_{R3}	$4.3I_m$	$3V_m$	$12.9V I_{m m}$				
I_{R4}	$4.3I_m$	$2V_m$	$8.6V I_{m m}$	I_{R4}	$4.3I_m$	$2V_m$	$8.6V I_{m m}$				
I_{R5}	$4.3I_m$	V_m	$4.3V I_{m m}$	I_{R5}	$4.3I_m$	V_m	$4.3V I_{m m}$				

ตาราง 3 (ต่อ)

Simulation									
Configuration	I_{sc}	V_{oc}	GMPP	I_{mpp}	V_{mpp}	% FF	% ML	% η	% EP
TST Std.	3.34	110.20	188.71	2.11	89.60	51.25	32.34	11.03	-
SD_D1	2.88	110.01	196.81	2.14	91.84	62.03	26.90	11.50	4.29
SD_D2	2.88	110.01	196.81	2.14	91.84	62.03	26.90	11.50	4.29
SD_U1	2.88	110.01	196.81	2.14	91.84	62.03	26.90	11.50	4.29
SD_U2	2.88	110.01	196.81	2.14	91.84	62.03	26.90	11.50	4.29



ภาพ 14 เส้นโค้งคุณลักษณะ P-V ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 การบังเงาแบบ SN

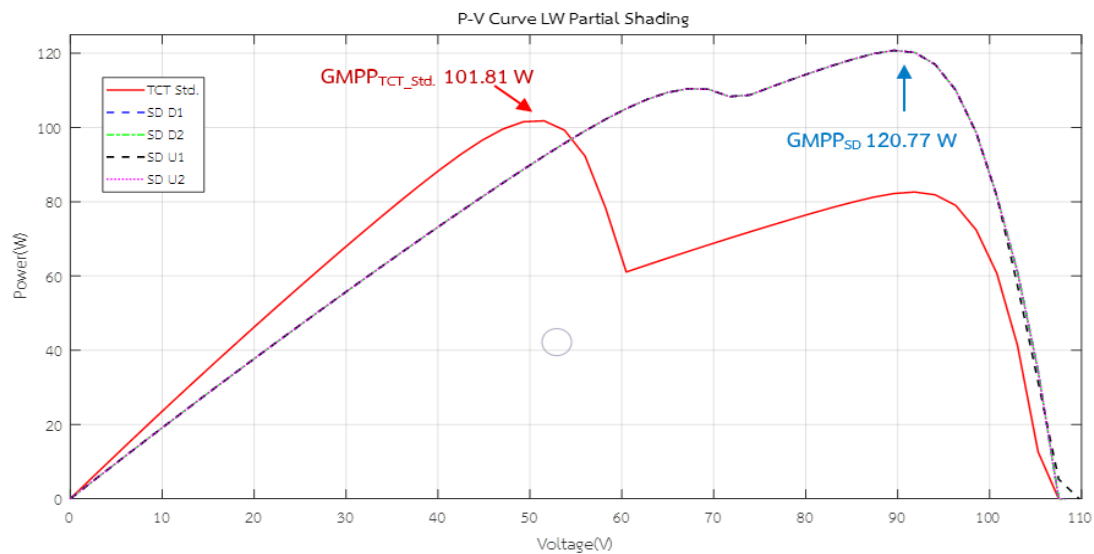


ภาพ 15 การบังเงาบางส่วนแบบ LW บนอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 และการกระจายรูปแบบเงา

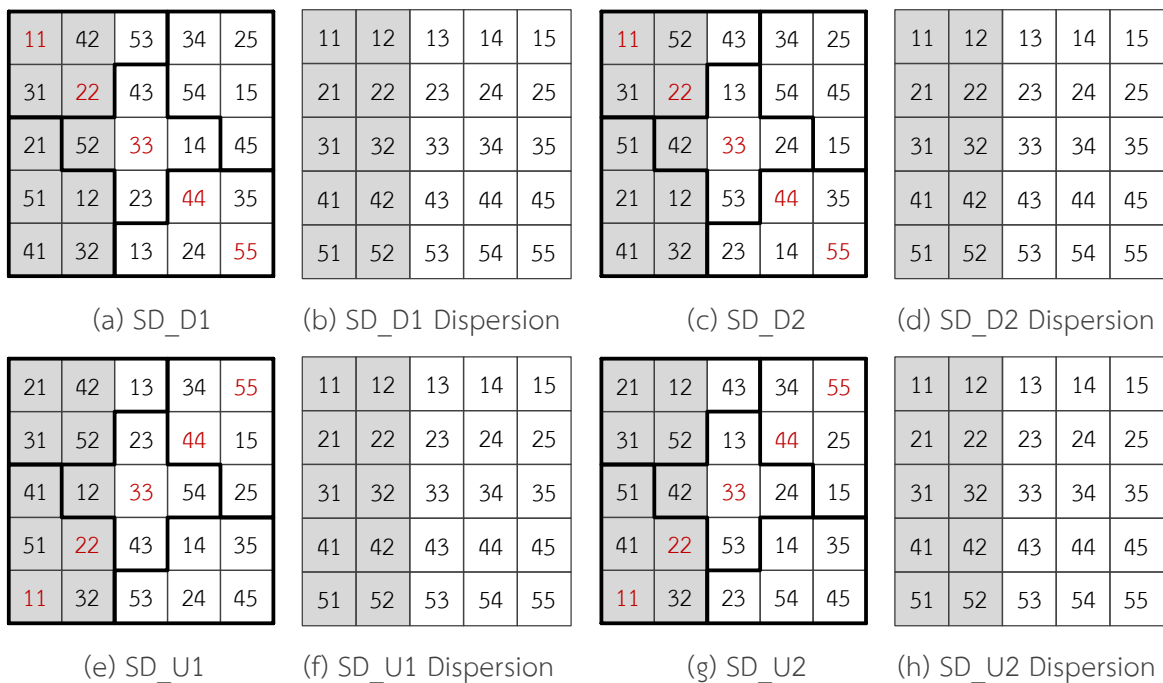
ตาราง 4

ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ LW

Calculation											
TST Std.				SD_D1				SD_D2			
Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o
I_{R1}	$1.5I_m$	$5V_m$	$7.5V_{mm}$	I_{R1}	$2.2I_m$	$5V_m$	$11V_{mm}$	I_{R1}	$2.2I_m$	$5V_m$	$11V_{mm}$
I_{R2}	$1.5I_m$	$4V_m$	$6V_{mm}$	I_{R2}	$2.9I_m$	$4V_m$	$11.6V_{mm}$	I_{R2}	$2.9I_m$	$4V_m$	$11.6V_{mm}$
I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V_{mm}$	I_{R3}	$2.9I_m$	$3V_m$	$8.7V_{mm}$	I_{R3}	$2.9I_m$	$3V_m$	$8.7V_{mm}$
I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V_{mm}$	I_{R4}	$2.9I_m$	$2V_m$	$5.8V_{mm}$	I_{R4}	$2.9I_m$	$2V_m$	$5.8V_{mm}$
I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V_{mm}$	I_{R5}	$2.9I_m$	V_m	$2.9V_{mm}$	I_{R5}	$2.9I_m$	V_m	$2.9V_{mm}$
				SD_U1				SD_U2			
				Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o
				I_{R1}	$2.2I_m$	$5V_m$	$11V_{mm}$	I_{R1}	$2.2I_m$	$5V_m$	$11V_{mm}$
				I_{R2}	$2.9I_m$	$4V_m$	$11.6V_{mm}$	I_{R2}	$2.9I_m$	$4V_m$	$11.6V_{mm}$
				I_{R3}	$2.9I_m$	$3V_m$	$8.7V_{mm}$	I_{R3}	$2.9I_m$	$3V_m$	$8.7V_{mm}$
				I_{R4}	$2.9I_m$	$2V_m$	$5.8V_{mm}$	I_{R4}	$2.9I_m$	$2V_m$	$5.8V_{mm}$
				I_{R5}	$2.9I_m$	V_m	$2.9V_{mm}$	I_{R5}	$2.9I_m$	V_m	$2.9V_{mm}$
Simulation											
Configuration	I_{sc}	V_{oc}	GMPP	I_{mpp}	V_{mpp}	% FF	% ML	% η	% EP		
TST Std.	2.41	106.07	101.81	1.98	51.52	39.84	145.31	8.97	-		
SD_D1	1.94	107.47	120.77	1.35	89.60	57.81	106.80	10.64	18.63		
SD_D2	1.94	107.47	120.77	1.35	89.60	57.81	106.80	10.64	18.63		
SD_U1	1.94	107.47	120.77	1.35	89.60	57.81	106.80	10.64	18.63		
SD_U2	1.94	107.47	120.77	1.35	89.60	57.81	106.80	10.64	18.63		



ภาพ 16 เส้นโค้งคุณลักษณะ P-V ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 การบังเงาแบบ LW

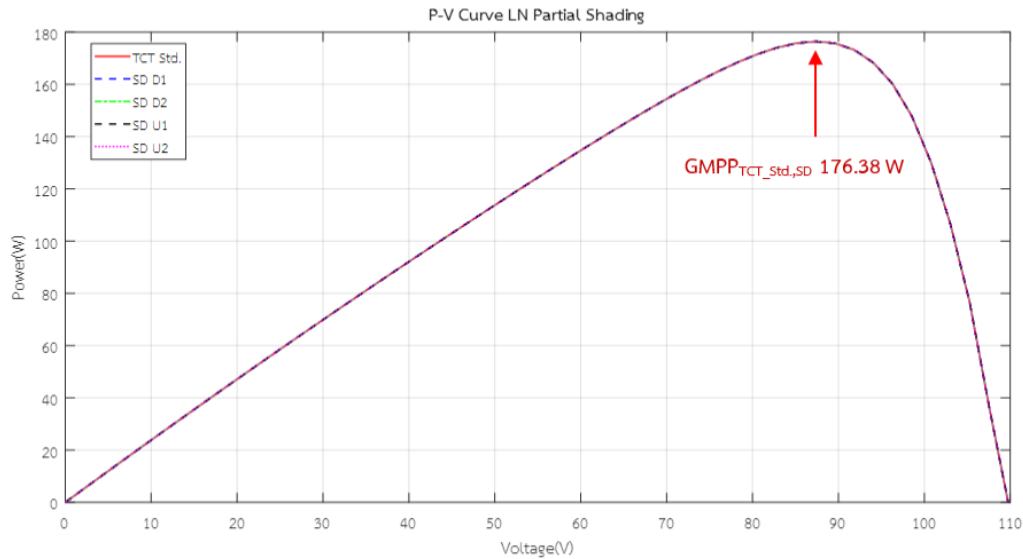


ภาพ 17 การบังเงาบางส่วนแบบ LN บนอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 และการกระจายรูปแบบเงา

ตาราง 5

ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ผลการจำลองหาพารามิเตอร์และผลการประเมินสมรรถนะของอาร์เรย์ ภายใต้การบังเงาบางส่วนแบบ LN

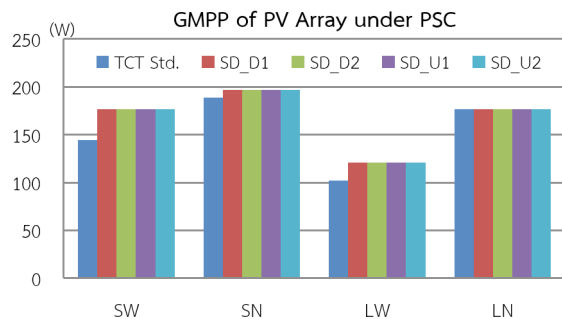
Calculation											
TST Std.				SD_D1				SD_D2			
Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o
I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{mm}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{mm}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{mm}$
I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{mm}$	I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{mm}$	I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{mm}$
I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{mm}$	I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{mm}$	I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{mm}$
I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V I_{mm}$	I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V I_{mm}$	I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V I_{mm}$
I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V I_{mm}$	I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V I_{mm}$	I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V I_{mm}$
				SD_U1				SD_U2			
				Row	I_{Rn}	V_i	P_o	Row	I_{Rn}	V_i	P_o
				I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{mm}$	I_{R1}	$3.6I_m$	$5V_m$	$18V I_{mm}$
				I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{mm}$	I_{R2}	$3.6I_m$	$4V_m$	$14.4V I_{mm}$
				I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{mm}$	I_{R3}	$3.6I_m$	$3V_m$	$10.8V I_{mm}$
				I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V I_{mm}$	I_{R4}	$3.6I_m$	$2V_m$	$7.2V I_{mm}$
				I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V I_{mm}$	I_{R5}	$3.6I_m$	V_m	$3.6V I_{mm}$
Simulation											
Configuration	I_{sc}	V_{oc}	GMPP	I_{mpp}	V_{mpp}	% FF	% ML	% η	% EP		
TST Std.	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	-		
SD_D1	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	0.00		
SD_D2	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	0.00		
SD_U1	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	0.00		
SD_U2	2.42	109.20	176.38	2.02	87.36	66.84	41.59	11.91	0.00		



ภาพ 18 เส้นโค้งคุณลักษณะ P-V ของอาร์เรย์โมดูลจัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 การบังเงาแบบ LN

การอภิปรายผล

การเปรียบเทียบ GMPP และสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลที่จัดเรียงโดยการปรับปรุงชุด 5X5 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการจัดเรียงแบบ TCT Std. แสดงดังภาพ 19 และตาราง 6 ตามลำดับ



ภาพ 19 เปรียบเทียบ GMPP ของอาร์เรย์โมดูลภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน

ตาราง 6

สมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน

Config.	Param.	SW	SN	LW	LN
TCT	P_O	15V / $m m$	18V / $m m$	10.8V / $m m$	18V / $m m$
	GMPP	144.47	188.71	101.81	176.38
	% FF	40.09	51.25	39.84	66.84
	% ML	72.87	32.34	145.31	41.59
	% η	9.76	11.03	8.97	11.91

ตาราง 6 (ต่อ)

Config.	Param.	SW	SN	LW	LN
Sudoku	P_O	18V / $m m$	18V / $m m$	11.6V / $m m$	18V / $m m$
	% $EP_{P_{col}}$	20.00	0.00	7.40	0.00
	GMPP	176.38	196.81	120.77	176.38
	% FF	66.84	62.03	57.81	66.84
	% ML	41.59	26.90	106.80	41.59
	% η	11.91	11.50	10.64	11.91
	% EP	22.09	4.29	18.63	0.00

จากภาพ 19 และตาราง 6 จะพบว่า การจัดเรียงที่นำเสนอทั้ง 4 รูปแบบ ให้กำลังผลิตเท่ากันในแต่ละการบังเงา ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าทางทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง การจัดเรียงโดยใช้เทคนิคที่นำเสนอสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพิ่มฟิลล์แพคเตอร์ ลดความสูญเสียจากการไม่เข้ากัน เพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มกำลังผลิตได้ 3 จาก 4 รูปแบบการบังเงาที่ศึกษา โดยสามารถเพิ่มกำลังผลิตในกรณี SN LW และ SW ได้ร้อยละ 4.29 18.63 และ 22.09 ตามลำดับ สำหรับกรณี LN การจัดเรียงที่นำเสนอไม่สามารถเพิ่มกำลังผลิตได้ เนื่องจาก LN มีรูปแบบการบังเงาทั้งคอลัมน์ จำนวน 2 คอลัมน์ ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอเป็นการจัดเรียงตำแหน่งโมดูลภายในคอลัมน์ ดังนั้นจึงไม่สามารถกระจายรูปแบบการบังเงา

ได้ สอดคล้องกับ Madhanmohan, Nandakumar and Saleem (2020); Rajani and Ramesh (2021) ซึ่งใช้รูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งอาร์เรย์ภายในคอลัมน์เช่นเดียวกัน สามารถเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลจากการบังเงาบางส่วนแบบ LN ได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรบังเงารูปแบบอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งใช้วิธีการจัดเรียงตำแหน่งของโมดูลใหม่โดยตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าคงเดิม โดยการปรับปรุงชุด 5X5 จำนวน 4 รูปแบบ (1) SD_D1 (2) SD_D2 (3) SD_U1 และ (4) SD_U2 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ (1) SW (2) SN (3) LW และ (4) LN ซึ่งใช้โมเดลของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 10 วัดต์ในการศึกษา

ประเมินสมรรถนะโดยการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าทางทฤษฎีและคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองบน MATLAB/Simulink ซึ่งผลการคำนวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าทางทฤษฎี พบว่า การจัดเรียงด้วยเทคนิคที่เสนอทั้ง 4 รูปแบบให้กำลังผลิตเท่ากันในแต่ละการบังเงาที่ศึกษา สามารถลดผลกระทบการบังเงาบางส่วน โดยช่วยให้ GMPP FF η และ EP เพิ่มขึ้น และช่วยให้ลด ML ลดลงได้ 3 จาก 4 รูปแบบที่ศึกษา ได้แก่ SN LW และ SW ตามลำดับ ซึ่งมีความสูญเสียจากการไม่เข้ากันลดลงร้อยละ 16.82 26.50 และ 42.93

ฟิลล์แฟคเตอร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.38 31.08 และ 40.02 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.09 15.70 และ 18.05 กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.29 18.63 และ 22.09 ตามลำดับ สำหรับการบังเงาแบบ LN ไม่สามารถลดผลกระทบการบังเงาบางส่วนได้ เนื่องจากเทคนิคที่เสนอใช้การจัดเรียงภายในคอลัมน์และการบังเงาแบบ LN เป็นการบังเงาทั้งคอลัมน์ จำนวน 2 คอลัมน์ จึงไม่สามารถกระจายรูปแบบการบังเงาได้ และเมื่อพิจารณาผลจากการบังเงาแบบ SN ซึ่งมีรูปแบบการบังเงา จำนวน 2 คอลัมน์ คอลัมน์ละ 3 โมดูล พบว่า สามารถเพิ่มกำลังผลิตได้เพียงร้อยละ 4.29 สอดคล้องกับแบบ LN

ผลจากการศึกษา พบว่า รูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วนได้ โดยการกระจายรูปแบบการบังเงา ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ การจัดเรียงอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการปรับปรุงชุด 5X5 แบบกากบาท ร่วมกับการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในแนวทแยงมุมและการจัดเรียงในคอลัมน์สามารถกระจายรูปแบบการบังเงาบางส่วนได้ โดยเฉพาะการบังเงาบางส่วนซึ่งมีรูปแบบการบังเงาทั้งแถว สามารถเพิ่มกำลังผลิตได้ร้อยละ 22.09 และ 18.63 สำหรับรูปแบบการบังเงาทั้งคอลัมน์เทคนิคที่นำเสนอไม่สามารถเพิ่มกำลังผลิตได้อย่างเด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกรบังเงาทั้งแถว ทั้งนี้ เทคนิคที่นำเสนอสามารถเพิ่มสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถลดจุดกำลังไฟฟ้าสูงหลายจุดในเส้นโค้งคุณลักษณะ P-V ได้ 3 จาก 4 รูปแบบการบังเงาที่ศึกษาดังแสดงในภาพ 12 14 และ 16



References

- Bala Raju, V., & Chengaiah, Ch. (2019). Performance analysis of conventional, hybrid and optimal PV array configurations of partially shaded modules. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(1), 3061-3073. doi: 10.35940/ijeat.A1661.109119
- Krishna, G. S., & Moger, T. (2019). Improved SuDoKu reconfiguration technique for total-cross-tied PV array to enhance maximum power under partial shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 333–348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.037>
- Madhanmohan, V. P., Nandakumar, M., & Saleem, A. (2020). Enhanced performance of partially shaded photovoltaic arrays using diagonally dispersed total cross tied configuration. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, 1-19. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1826008>

- Mishra, D. B., Mishra, R., Das, K. N., & Acharya, A. A. (2018). Solving Sudoku puzzles using evolutionary techniques-a systematic survey. *Soft Computing: Theories and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 583, 791-802. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5687-1_71
- Nahidan, M. H., Niroomand, M., & Dehkordi, B. M. (2021). Power enhancement under partial shading condition using a two-step optimal PV array reconfiguration. *International Journal of Photoenergy*, 2021, 8811149. <https://doi.org/10.1155/2021/8811149>
- Namhormchan, T. (2021). Comparative study of PV array performance from array topologies under partial shading using magic square row shifting technique. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(3), 84-104. (in Thai)
- Nihanth, M. S. S., Ram, J. P., Pillai, D. S., Ghias, A. M. Y. M., Garg, A., & Rajasekar, N. (2019). Enhanced power production in PV arrays using a new skyscraper puzzle based one-time reconfiguration procedure under Partial Shade Conditions (PSCs). *Solar Energy*, 194, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.020>
- Rajani, K., & Ramesh, T. (2021). Maximum power enhancement under partial shadings using a modified Sudoku reconfiguration. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(6), 1187-1201. doi: 10.17775/CSEEPES.2020.01100
- Rezazadeh, S., Moradzadeh, A., Pourhossein, K., Akrami, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & Anvari-Moghaddam, A. (2022). Photovoltaic array reconfiguration under partial shading conditions for maximum power extraction: A state-of-the-art review and new solution method. *Energy Conversion and Management*, 258, 1-36. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115468>
- Rezazadeh, S., Moradzadeh, A., Pourhossein, K., Mohammadi-Ivatloo, B., & García Márquez, F. P. (2022). Photovoltaic array reconfiguration under partial shading conditions for maximum power extraction via knight's tour technique. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2022, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-03723-1>
- Sahu, H. S., & Nayak, S. K. (2013). Extraction of maximum power from a PV array under nonuniform irradiation conditions. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63(12), 4825-4831. doi: 10.1109/TED.2016.2616580.
- Tatabhatla, V. M. R., Agarwal, A., & Kanumuri, T. (2020). Enhanced performance metrics under shading conditions through experimental investigations. *IET Renewable Power Generation*, 14(14), 2592-2603. doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0240
- Ye, C., Tai, C., Huang, Y., & Chen, J. (2021). Dispersed partial shading effect and reduced power loss in a PV array using a complementary SuDoKu puzzle topology. *Energy Conversion and Management*, 246, 114675. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114675>

