

การศึกษาเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน

Comparative Study of Enhanced Power Generation

From PV Array Under Partial Shading Conditions

ธนกร น้าหอมจันทร์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาคือเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการจัดวางโมดูลในอาร์เรย์สำหรับเพิ่มกำลังผลิตจากอาร์เรย์ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน ใช้การเชื่อมต่อโมดูลแบบ TCT ในการศึกษา โดยเปรียบเทียบผลการจัดวางแบบคงที่และแบบ ซู โด กู เพื่อกระจายผลกระทบเงาบังต่ออาร์เรย์ทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงโมดูลทั้ง 2 แบบสามารถทำได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของโมดูลในอาร์เรย์ ช่วยลดผลกระทบของการบังเงาของโมดูลในแถว ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังผลิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังผลิตใน 4 รูปแบบการบังเงาที่แตกต่างกัน ผลการเปรียบเทียบ พบว่า การจัดวางตำแหน่งโมดูลของอาร์เรย์ของทั้ง 2 เทคนิคช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนได้

คำสำคัญ: พลังงานหมุนเวียน เซลล์แสงอาทิตย์, การจัดวางอาร์เรย์, การสูญเสียกำลังไฟฟ้า, บังเงาบางส่วน

Abstract

This paper presents a study to enhance power generation from PV array under partial shading by comparing reconfiguration technique. In this approach, the physical location of the modules is connected in a Total Cross Tied (TCT) array and are arranged in a Fixed and Su Do Ku pattern for disperse the shading effect over the entire array. Further, this arrangement of modules is done without altering the electrical connection of the modules in the array; reduce the effect of shading of modules in any row thereby enhancing the generated PV power. The performance of the system is investigated for four different shading patterns and the results show that positioning the modules of the array yields improved performance under partially shaded conditions.

Keywords: renewable energy, photovoltaic, array configuration, mismatch, partial shading

ความนำ

ปัจจุบันพลังงานหมุนเวียนได้เข้ามามีบทบาทในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นตามลำดับ สาเหตุจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณที่ลดลงและส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม (Petroni, G., Spagnuolo, G., Teodorescu, R., Veerachary, M. & Vitelli, M., 2008) พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากมีการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ที่ติดตั้งบนหลังคา (PV Rooftop) ขนาดไม่กี่กิโลวัตต์จนถึงการติดตั้งเป็นฟาร์มผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar farm) ขนาดหลายเมกะวัตต์โดยมีการติดตั้งเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 30% ทุกปีในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (Syafaruddin, Karatepe, E. & Hiyama, T., 2009) เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งถือว่าไม่มีต้นทุนในการผลิตกำลังไฟฟ้า

การบำรุงรักษาต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้ต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง (Hua, C., Lin, J. & Shen, C., 1998)

การเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยมากจะเชื่อมต่อแต่ละแผงแบบอนุกรม (String) เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามที่กำหนดและนำแต่ละ String มาต่อแบบขนานเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เรียกว่า อาร์เรย์ (PV Array) การเชื่อมต่อโมดูลแบบคงที่ที่นิยมใช้กันอยู่แพร่หลายมี 3 รูปแบบ ดังนี้ series-parallel (SP), total cross tied (TCT) และ bridge linked (BL) (Rao, P. S., Ilango G. S. & Nagamani, C., 2014; Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2013) และการเชื่อมต่อโมดูลแบบปรับเปลี่ยนได้โดยใช้ตัวควบคุม (Electrical Array Reconfiguration--EAR) เป็นวิธีที่มีกำลังผลิตสูง แต่จะต้องใช้เซ็นเซอร์และสวิตช์ตัดตอนอัตโนมัติเป็นจำนวนมาก รวมถึงการใช้ตัวควบคุม ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมต่อโมดูลที่มีราคาสูง ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV Array ลดลงคือ การบังเงาบางส่วน (Partial Shading) ซึ่งในกรณีของ Rooftop โดยมากเกิดจากการบังเงาของก้อนเมฆ ต้นไม้ เสาไฟฟ้า อาคารสูง เป็นต้น สำหรับ Solar Farm จะเกิดจากการบังเงาก้อนเมฆเท่านั้นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของ PV Array เนื่องจากการบังเงาบางส่วนไม่ได้เป็นสัดส่วนกับพื้นที่บังเงาแต่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการบังเงา การจัดวางอาร์เรย์ และตำแหน่งของโมดูลในอาร์เรย์ที่ถูกบังเงา (Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2013; Moballegh, S. & Jiang, J., 2011)

วัตถุประสงค์การวิจัย

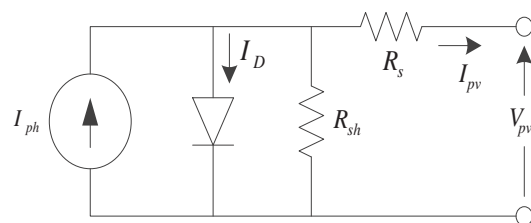
บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนระหว่างการจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่ (Rao, P.

S., Ilango G. S. & Nagamani, C., 2014) การจัดวางอาร์เรย์แบบ Su Do Ku (Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2013) ซึ่งเป็นวิธีการจัดเรียงตำแหน่งใหม่ของโมดูลในคอลัมน์ของอาร์เรย์โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างโมดูล เพื่อลดผลจากการบังเงาของโมดูลในแถวเดียวกัน และเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array โดยใช้ PV Module อาร์เรย์ 9×9 เชื่อมต่อแบบ TCT ในการศึกษาเปรียบเทียบ

เซลล์แสงอาทิตย์

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแสต่อขนานกับไดโอด วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังภาพที่ 1

การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะโมดูล (PV Module) จะเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะอนุกรม คุณลักษณะแรงดันและกระแสเอาต์พุตของ PV Module ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ (Insolation; G) เขียนได้ดังสมการที่ (1)



ภาพ 1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right] \quad (1)$$

โดยที่ I_{pv} คือ กระแสของโมดูล I_{ph} คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริก I_0 คือ กระแสอิ่มตัว V_{ph} คือ แรงดันเอาต์พุตของ PV และ $A = nkT/q$ โดยที่ n คือ แฟกเตอร์ไดโอดในอุดมคติ (Diode Ideality Factor) k คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann) T คือ อุณหภูมิของโมดูล หน่วยเป็น เคลวิน q คือ ประจุไฟฟ้า (1.602×10^{-19} C) R_s

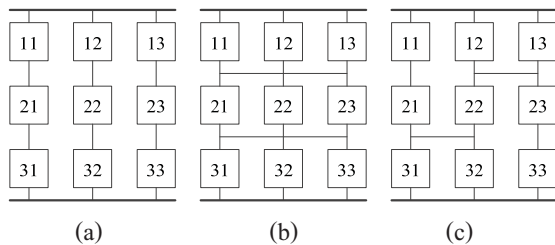
และ R_{sh} คือ ค่าความต้านทานอนุกรมและขนานตามลำดับ กระแสที่เกิดจากแสงอาทิตย์หาได้จากฟังก์ชันกระแสลัดวงจร ดังสมการที่ (2)

$$I_{ph} = I_{SCO} \left(\frac{G}{G_o} \right) (1 + \alpha_1 (T - T_o)) \frac{(R_s + R_{sh})}{R_{sh}} \quad (2)$$

โดยที่ I_{SCO} คือ กระแสลัดวงจรของโมดูลที่ความเข้มแสงอาทิตย์มาตรฐาน G_o ($1,000 \text{ W/m}^2$) และอุณหภูมิมาตรฐาน T_o (25°C) และ α_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจรของโมดูล

รูปแบบการเชื่อมต่อ PV Module

การเชื่อมต่อ PV Module แบบคงที่ที่นิยมใช้กันอยู่แพร่หลาย มี 3 รูปแบบ ดังนี้ series-parallel (SP), total cross tied (TCT) และ bridge linked (BL) (Rao, P. S., Ilango G. S. & Nagamani, C., 2014; Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2013) แสดงดังภาพ 2

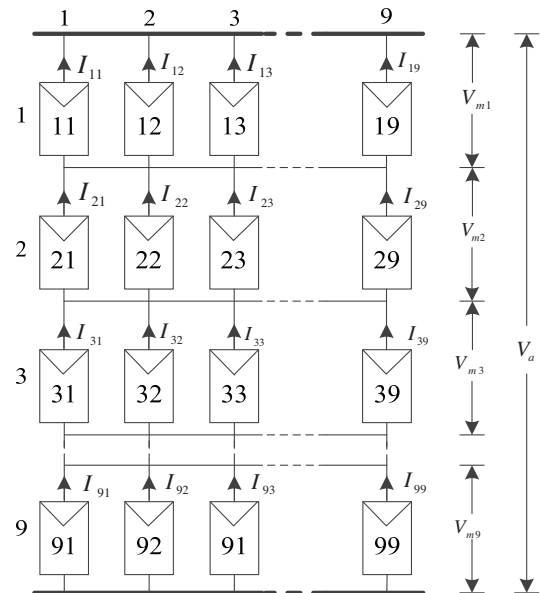


ภาพ 2 รูปแบบการเชื่อมต่อ PV Module; a) แบบ series-parallel, b) แบบ total cross tied และ c) แบบ bridge linked

G. Velasco-Quesada และคณะ (Velasco-Quesada, G., Guinjoan-Gispert, F., Pique-lopez, R., Roman-Lumbreras, M. & Conesa-Roca, A., 2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการเชื่อมต่อ PV Module ที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน พบว่า การ

เชื่อมต่อแบบ TCT ช่วยลดการสูญเสียได้มากที่สุด ในการศึกษาจะเลือกใช้การเชื่อมต่อแบบคงที่ โดยใช้ PV Module อาร์เรย์ 9×9 เชื่อมต่อแบบ TCT ดังภาพ 3

จากภาพ 3 แสดงการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 81 โมดูล (9 แถว 9 คอลัมน์) แต่ละโมดูลจะมีหมายเลข 'pq' กำกับ ซึ่งหมายถึง แถว p และคอลัมน์ q ของโมดูลที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น โมดูลหมายเลข 39 เป็นโมดูลที่ตั้งอยู่ในแถวที่สามและคอลัมน์ที่เก้ากระแสที่สร้างขึ้นโดยโมดูลที่ความเข้มแสงอาทิตย์ G หาได้จากสมการที่ (3)



ภาพ 3 PV Array 9×9 เชื่อมต่อแบบ TCT

$$I = kI_m \quad (3)$$

โดยที่ I_m คือ กระแสสร้างขึ้นโดยโมดูลที่ความเข้มแสงอาทิตย์มาตรฐาน $G_o = 1,000 \text{ W/m}^2$ และ $k = G/G_o$ ดังนั้นกระแสที่สร้างขึ้นโดยโมดูลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์บน แผงแรงดันไฟฟ้าของอาร์เรย์หาได้จากผลรวมของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 9 แถว โดยใช้ KVL

$$V_a = \sum_{p=1}^9 V_{mp} \quad (4)$$

โดยที่ V_a คือ แรงดันไฟฟ้าของ PV array และ V_{mp} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแผงแต่ละแถว

กระแสของ PV array หาได้โดยใช้ KCL ที่แต่ละโนด จะได้

$$I_a = \sum_{q=1}^9 (I_{pq} - I_{(p+1)q}) = 0, \quad p = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (5)$$

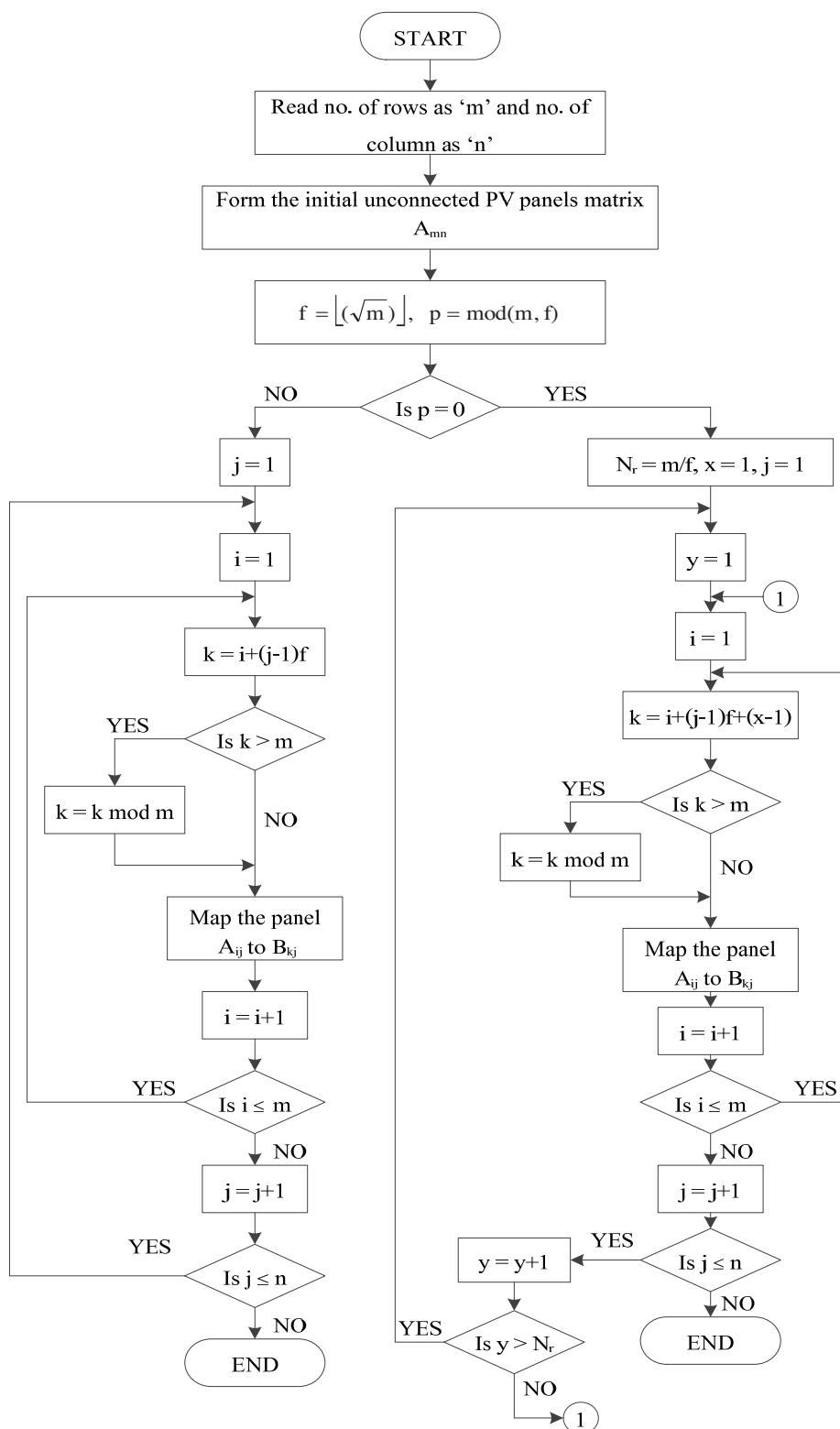
การศึกษาเปรียบเทียบ

การศึกษาเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนในบทความนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่ การจัดวางอาร์เรย์แบบ Su Do Ku โดยใช้ PV Module อาร์เรย์ 9×9 เชื่อมต่อแบบ TCT ในการศึกษาเปรียบเทียบ

การจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่

P. S. Rao และคณะ (Rao, P. S., Ilango G. S. & Nagamani, C., 2014) ได้เสนออัลกอริทึมการจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่เพื่อลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วน ดังภาพที่ 4 โดยแสดงตัวอย่างการจัดวางและจำลองผลการทดสอบบน MATLAB/ Simulink ด้วยวิธีที่เสนอกับอาร์เรย์ 3×3 ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบ TCT การบังเงาบางส่วน 6 รูปแบบพบว่าวิธีการจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่ทำให้ PV Array สามารถกระจายผลกระทบการบังเงาบางส่วนและผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่า 0-23.22 เปอร์เซ็นต์และผลิตกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับแบบ EAR ซึ่งถือว่าประหยัดกว่าแบบ EAR เพราะไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์และสวิตช์ตัดคอนแอคโตนมิต

อาร์เรย์ขนาด 9×9 แสดงดังภาพที่ 5 (a) ฉะนั้น $m = n = 9$, $f = 3$ และ $p = 0$ ผลการจัดวางตำแหน่งโมดูลใหม่โดยใช้อัลกอริทึมการจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่ แสดงดังภาพที่ 5(b) ตารางที่ 1 แสดงการจัดวางโมดูลใหม่ในแต่ละคอลัมน์ของ อาร์เรย์ขนาด 9×9 ตามภาพ 4



ภาพ 4 อัลกอริทึมการจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่

Note. from Maximum power from PV arrays using a fixed configuration under different shading conditions, by Rao, P. S., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2014, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), pp. 679-686.

ตาราง 1

การจัดวางโมดูลใหม่ในแต่ละคอลัมน์ของอาร์เรย์ขนาด 9×9

m = 9, f = 3 and p = 0		
Col. No.	Number to be added to the row index to get renumbered value	
1	0	Group- I
2	3	
3	6	
4	1 (10-9=1)	Group- II
5	4 (13-9=4)	
6	5 (16-9=5)	
7	2 [20-(9×2)=2]	Group- III
8	5 [23-(9×2)=5]	
9	8 [26-(9×2)=18]	

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(a)

11	72	43	94	65	56	87	58	29
21	82	53	14	75	66	97	68	39
31	92	63	24	85	76	17	78	49
41	12	73	34	95	86	27	88	59
51	22	83	44	15	96	37	98	69
61	32	93	54	25	16	47	18	79
71	42	13	64	35	26	57	28	89
81	52	23	74	45	36	67	38	99
91	62	33	84	55	46	77	48	19

(b)

ภาพ 5 อาร์เรย์ขนาด 9×9 a) การจัดวางเริ่มต้นและ b) จัดวางตำแหน่งโมดูลใหม่ตาม

Note. from Maximum power from PV arrays using a fixed configuration under different shading

conditions, by Rao, P. S., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2014, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), pp. 679-686.

การจัดวางอาร์เรย์แบบ Su Do Ku

B. I. Rani และคณะ (Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2013) ได้เสนอวิธีการจัดวางอาร์เรย์แบบ Su Do Ku เพื่อลดผลกระทบจากการบังเงาบางส่วน โดยใช้อาร์เรย์ขนาด 9×9 ซึ่งเลือกรูปแบบการจัดวางดังภาพที่ 6 โดยทำการเปรียบเทียบกับแบบ TCT ใน 4 เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน ซึ่งแบบที่นำเสนอสามารถกระจายผลกระทบการบังเงาบางส่วนและเพิ่มกำลังผลิตได้ 3.6 – 26.1 เปอร์เซ็นต์

11	42	53	94	25	76	87	68	39
21	92	73	84	35	66	57	18	49
31	82	63	44	55	16	97	78	29
41	32	13	54	85	96	77	28	69
51	22	93	64	75	46	17	38	89
61	72	83	24	15	36	47	98	59
71	12	23	34	45	56	67	88	99
81	62	43	74	95	26	37	58	19
91	52	33	14	65	86	27	48	79

ภาพ 6 รูปแบบการจัดวางแบบ Su Do Ku

Note. from Enhanced power generation from PV Array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration, by Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2013, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), pp. 594-601.

กรณีศึกษา

คุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ทดสอบตามสภาวะมาตรฐาน ของ PV Module ที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังตาราง 2

ตาราง 2

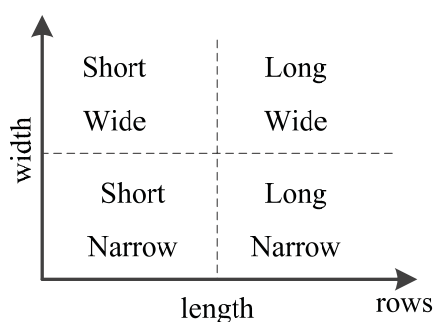
คุณลักษณะของ PV Module ที่ $1,000 \text{ W/m}^2$, 25°C

Electric Specification	Rated
Nominal Maximum Power ($P_{\max}$)	255 W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.4 V
Short Circuit Current (I_{sc})	9.0 A
Optimum Operating Voltage (V_{mp})	30.2 V
Optimum Operating Current (I_{mp})	8.43 A

Note. from CS6P-250|255|260P PV Module Product Datasheet, by Canadian Solar, 2014, Ontario:

Canadian Solar.

กรณีศึกษาที่ใช้เปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array ระหว่างการจัดวางอาร์เรย์แบบคงที่ (Fixed) และแบบ Su Do Ku ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ ดังนี้ 1) Short Wide (SW), 2) Short Narrow (SN), 3) Long Wide (LW) และ 4) Long Narrow (LN) โดยทำการศึกษาจากจำนวนของคอลัมน์ (ความกว้าง) และ จำนวนโมดูลต่อคอลัมน์ (ความยาว) ที่มีเงาบัง ดังภาพที่ 7



ภาพ 7 รูปแบบเงื่อนไขการบังเงาบางส่วน

Note. from Enhanced power generation from PV Array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration, by Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C., 2013, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), pp. 594-601.

ขนาดและลักษณะการบังเงาบางส่วนที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 4 กรณี แสดงดังภาพ 8

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(a)

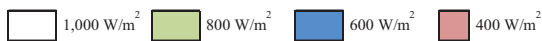
11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(b)

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(c)

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99



(d)

ภาพ 8 ขนาดและลักษณะการบังเงาบางส่วน ของ PV Array ที่เชื่อมต่อบนแบบ TCT; a) Case 1. SW, b) Case 2. SN, c) Case 3. LW และ d) Case 4. LN

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ตัวอย่างการคำนวณ กรณีที่ 1) Short Wide

ลักษณะการบังเงาบางส่วนและการกระจายการบังเงาของการจัดวางโมดูลแบบ Fixed และ แบบ Su Do Ku แสดงดังภาพที่ 9 โดยภาพที่ 9(a) และ 9(b) แสดงการจัดวางแบบ Fixed ที่ได้รับการบังเงาบางส่วน และการกระจายเงาบัง ตามลำดับภาพที่ 9(c) และ 9(d) แสดงการจัดวางแบบ Su Do Ku ที่ได้รับการบังเงาบางส่วน และการกระจายเงาบัง ตามลำดับ

11	72	43	94	65	56	87	58	29
21	82	53	14	75	66	97	68	39
31	92	63	24	85	76	17	78	49
41	12	73	34	95	86	27	88	59
51	22	83	44	15	96	37	98	69
61	32	93	54	25	16	47	18	79
71	42	13	64	35	26	57	28	89
81	52	23	74	45	36	67	38	99
91	62	33	84	55	46	77	48	19

(a)

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(b)

11	42	53	94	25	76	87	68	39
21	92	73	84	35	66	57	18	49
31	82	63	44	55	16	97	78	29
41	32	13	54	85	96	77	28	69
51	22	93	64	75	46	17	38	89
61	72	83	24	15	36	47	98	59
71	12	23	34	45	56	67	88	99
81	62	43	74	95	26	37	58	19
91	52	33	14	65	86	27	48	79

(c)

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(d)

ภาพ 9 ลักษณะการบังเงาบางส่วน กรณีที่ 1; a) Fixed arrangement b) shade dispersion with Fixed arrangement c) Su Do Ku arrangement และ d) shade dispersion with Su Do Ku arrangement

จากภาพ 9(b) การบังเงาที่แตกต่างกันในแต่ละแถวของอาร์เรย์ โดยได้รับการบังเงาบางส่วนที่ความเข้มแสง 4 ระดับ ดังนี้ $1,000 \text{ W/m}^2$, 800 W/m^2 , 600 W/m^2 และ 400 W/m^2 ตามลำดับ สามารถคำนวณหากระแสที่สร้างขึ้น

ในแต่ละแถวในอาร์เรย์ ได้ดังนี้แถวที่ 1 และ 9 ได้รับ
ความเข้มแสง $1,000\text{W/m}^2$, 800W/m^2 และ 400W/m^2
จำนวน 6, 2 และ 1 โมดูลตามลำดับ กระแสของแถวที่ 1
และ 9 จากสมการที่ (3) จะได้

$$I_{R1} = I_{R9} = (6 \times I_m) + (2 \times 0.8I_m) + 0.4I_m = 8I_m \quad (6)$$

กระแสที่ผลิตได้จากแถวที่ 2, 5 และ 6 แสดงดังนี้

$$\begin{aligned} I_{R2} = I_{R5} = I_{R6} &= (5 \times I_m) + (2 \times 0.8I_m) + 0.6I_m + 0.4I_m \\ &= 7.6I_m \end{aligned} \quad (7)$$

กระแสที่ผลิตได้ในแถวที่ 3, 4, 7 และ 8 หาได้
เช่นเดียวกับสมการที่ (6) และ (7)

แรงดันอาร์เรย์ในกรณีที่ไม่มีแถวใดถูกบายพาสจะ
ได้ $V_a = 9V_m$ และในกรณีที่แถวใดแถวหนึ่งถูกบายพาส V_a
 $= 8V_m + V_d$ เมื่อ V_d คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด ซึ่ง
 $V_d \ll V_a$ จะสามารถละทิ้ง V_d ได้

กำลังไฟฟ้าที่อาร์เรย์ผลิตได้ แสดงดังสมการที่ (8)

$$P_a = I_m V_a = I_m (9V_m) \quad (8)$$

สำหรับการจัดวางแบบ Su Do Ku ในกรณี SW และ
กรณี SN, LW และ LN ทั้ง 2 รูปแบบการจัดวาง สามารถ
คำนวณหากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่อาร์เรย์ผลิต
ได้ เช่นเดียวกับการคำนวณการจัดวางแบบ Fixed กรณีที่
1

ผลการคำนวณกำลังผลิตสูงสุดทั้ง 4 กรณีแสดงดัง
ตาราง 3 ผลการเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของอาร์เรย์
ทั้ง 2 รูปแบบการจัดวาง โดยใช้ V_{mp} และ I_{mp} จาก
(Canadian Solar, 2014) ในการคำนวณ แสดงดังตาราง
ที่ 4

การจัดวางอาร์เรย์แบบ Su Do Ku เมื่อเปรียบเทียบ
กับการจัดวางแบบ Fixed สามารถเพิ่มกำลังผลิตได้ใน 3
กรณี คือ กรณีที่ 1, 2 และ 4 ในช่วง 2.5-6.1 เปอร์เซ็นต์
ซึ่งพบว่า การจัดวางแบบ Su Do Ku สามารถเพิ่มกำลัง
ผลิตได้มากเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขเงาบังบางส่วนใน
ลักษณะของเงาบังโมดูลในจำนวนแถวต่างๆ (กรณีที่ 1
และ 2) สำหรับ กรณีที่ 3) Long Wide ไม่สามารถเพิ่ม
กำลังผลิตได้ ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 3

ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้า

Fixed arrangement					Su Do Ku arrangement				
Case	Row current in the order in		Voltage	Power	Row current in the order in		Voltage	Power	
	which panels are bypassed		V _a	P _a	which panels are bypassed		V _a	P _a	
1	I _{R3}	7.2I _m	9V _m	64.8V _m I _m	I _{R1}	7.6I _m	9V _m	68.4V _m I _m	
2	I _{R3}	6.2I _m	9V _m	55.8V _m I _m	I _{R1}	6.6I _m	9V _m	59.4V _m I _m	
3	I _{R1}	7.6I _m	9V _m	68.4V _m I _m	I _{R5}	7.6I _m	9V _m	68.4V _m I _m	
4	I _{R4}	7.8I _m	9V _m	70.2V _m I _m	I _{R2}	8I _m	9V _m	72V _m I _m	

ตาราง 4

การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่อาร์เรย์ระหว่าง Fixed และ Su Do Ku

Case	Maximum power (W)		Power enhancement (%)
	Fixed arrangement	Su Do Ku arrangement	
1	11,957	12,622	5.3
2	10,296	10,961	6.1
3	12,622	12,622	0.0
4	12,954	13,286	2.5

สรุป

บทความนี้นำเสนอผลการเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Module ที่เชื่อมต่อแบบอาร์เรย์ระหว่าง

แบบ Fixed และ Su Do Ku ซึ่งทั้งสองแบบเป็นวิธีการจัดวางโมดูลโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า โดยใช้ PV Array 9×9 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนทั้ง 4 กรณี พบว่าการจัดวางแบบ Su Do Ku สามารถเพิ่มกำลังผลิตได้มากกว่าแบบ Fixed สอดคล้องกับ แต่ไม่สามารถเพิ่มกำลังผลิตในกรณีที่บังเงาบางส่วนตามกรณีที่ 3 ได้ ทั้งนี้การจัดวางแบบ Su Do Ku ที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบเป็นเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งการจัดวางแบบ Su Do Ku สามารถจัดวางได้หลายรูปแบบ ประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังผลิตที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการบังเงาบางส่วนของโมดูลในอาร์เรย์

เอกสารอ้างอิง

- Canadian Solar. (2014). CS6P-250|255|260P PV module product datasheet. Ontario: Canadian Solar.
- Hua, C., Lin, J. & Shen, C. (1998). Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(1), 99–107.
- Moballeggh, S. and Jiang, J. (2011). Partial shading modeling of photovoltaic system with experimental validations. *Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA*, 24-29 July 2011, 1-9.
- Petrone, G., Spagnuolo, G., Teodorescu, R., Veerachary, M. & Vitelli, M. (2008). Reliability issues in photovoltaic power processing systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 55(7), 2569–2580.
- Rani, B. I., Ilango, G. S. & Nagamani, C. (2013). Enhanced power generation from PV array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 4(3), 594-601.
- Rao, P. S., Ilango G. S. & Nagamani, C. (2014). Maximum power from PV arrays using a fixed configuration under different shading conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), 679-686.
- Syafaruddin, Karatepe, E. & Hiyama, T. (2009). Polar coordinate fuzzy controller based real-time maximum-power point control of photovoltaic system. *Renewable Energy*, 34(12), 2597-2606.
- Velasco-Quesada, G., Guinjoan-Gispert, F., Pique-lopez, R., Roman-Lumbreras, M. & Conesa-Roca, A. (2009). Electrical PV array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid connected systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 56(11), 4319–4331.