

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทันเวลา

Real- time Simulation using Mathematical model of Photovoltaic Cell/Module

เดชนิติน อิมปรีดา¹, วันชัย ทรัพย์สิงห์^{2*}

Datnitorn Impreeda¹, Wanchai Subsingha^{2*}

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรของไดโอด, ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำไปพัฒนาวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) เพื่อนำไปประยุกต์เชื่อมต่อกับวงจรแหล่งจ่ายจริงด้วยการดัดแปลงเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางพาณิชย์ ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย จากการทดสอบแบบจำลองพบว่าหากเซลล์มีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่ำและค่าความต้านทานขนานที่สูงจะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกและฟิลล์แฟกเตอร์ที่สูงขึ้น ตัวแปรไดโอดและอุณหภูมิทำงานของเซลล์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์และความเข้มแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ความเข้มแสง, อุณหภูมิ

Abstract

This article presents the mathematical model of the photovoltaic(PV) cell/module using general equations of solar cell in order to study the effect of solar irradiance, temperature, diode model parameter, series and shunt resistance of the PV cell compared to the output power. It will lead to analysis and development of the PV simulator using a DSP interfacing card, and it may be useful in comparing with commercial PV cell performance, and it is also useful in development of the PV control system. The results of the PV model show therefore that the pcell must have a high value of shunt resistor and a low value of series resistor for giving more output power and higher Fill Factor. The diode parameter and temperature affects the change in the open circuit voltage of a cell. From the simulation result it can be observed that as solar radiation falling on a PV cell is reduced, both short circuit current and open circuit voltage decrease, but the change in open circuit voltage is not as prominent with incident solar radiation as it is with short circuit current, which varies almost directly proportional to the solar irradiance

Keywords: Photovoltaic module, irradiance, temperature.

¹ นิสิตปริญญาโท, ² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Master degree student, ² Assist. Prof., Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

* Corresponding author; Wanchai Subsingha, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand. datnitorn_tit@hotmail.com

บทนำ

พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในประเทศไทยเนื่องด้วยพื้นที่ประเทศตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของโฟโตเอฟเฟค(Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้ เรียกว่า โซลาร์เซลล์ (Solar cell)¹ แต่ระบบของพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อเสียตรงที่ใช้ต้นทุนในการผลิตและการติดตั้งค่อนข้างสูง ในการทดลองนั้นมักจะมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์และอุณหภูมิที่มากนัก้อยต่างกันไปในแต่ละวัน ซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้ สามารถที่จะใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถจ่ายกระแส-แรงดันไฟฟ้าตามพฤติกรรมของโซลาร์เซลล์ได้จริง หากนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล หรือพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเป็นความสะดวกและรวดเร็วโดยที่สามารถทดลองในในเวลาใดก็ได้ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดหลากหลายประเภท เช่น ไพรานอมิเตอร์ เป็นต้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photo current) เกิดจากแสงสว่างไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหนดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อ PN Junction ซึ่งจะเขียนแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแส ในสมการที่ 1 แสดงถึงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์²

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{N \cdot K \cdot T} - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

- I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง ; A
- q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่า 1.602×10^{-19} C
- K คือ ค่าคงที่ของ Boltzman
- T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อของเซลล์ ; °K
- V คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด ; V
- N คือ Ideal factor
- I_s คือ กระแสไบอัสย้อนกลับของไดโอด;A
- R_s คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ; Ω
- R_{sh} คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ; Ω

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังแสดงในFigure 1

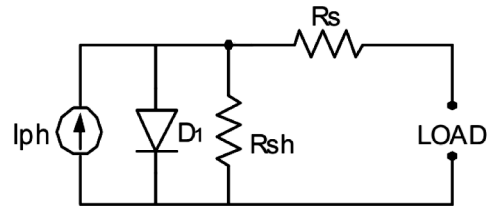


Figure 1 Single diode model with R_s and R_{sh}

จากFigure 1 จะเห็นว่ามี 5 ตัวแปรที่มีผลต่อกระแสและแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ I_s, N เป็นผลของไดโอด, ค่า I_{ph} เป็นผลของแสงที่ตกกระทบบน PV cell และค่า R_s, R_{sh} เป็นค่าความต้านทานซึ่งถือเป็นการสูญเสียที่เซลล์แสงอาทิตย์

ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ค่า I_{ph} นั้นเป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง และอุณหภูมิ ดังสมการที่ 2³

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_1 \cdot (T - T_{ref})) \lambda \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้

- I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25 °C ; A
- K_1 คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร ; A/°C
- λ คือ ความเข้มแสง ; kW/m²

ผลกระทบของอุณหภูมิ

หากกำหนดให้ความเข้มแสงมีค่าคงที่ จากสมการที่ 2 ค่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรสัมพันธ์อุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมิยังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode (I_s) ดังสมการที่ 3³

$$I_s(T) = I_{s,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N \cdot V_t} \right) \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้

E_g คือ Band gap energy of semiconductor

V_t คือ Thermal voltage at room temperature

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับพิกัดขนาดแรงดันของแบตเตอรี่ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ 1 หากไม่คิดผลของ R_s และ R_{sh} จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ 4²

$$I = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_s \left(\exp \frac{q \cdot V}{N \cdot K \cdot T \cdot n_s} - 1 \right) \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้

n_p คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน

n_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)

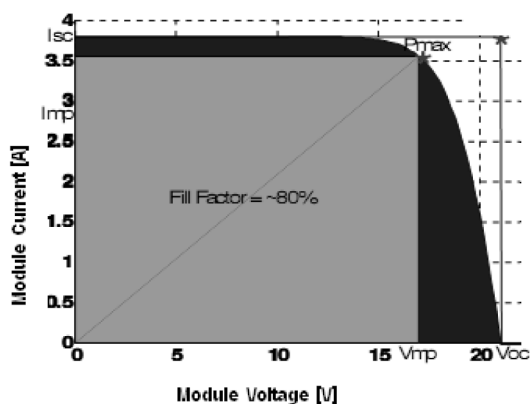


Figure 2 Fill Factor of PV Module

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ I-V curve ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถสร้าง I-V curve ได้ดัง Figure 2 ซึ่งจะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า Maximum Power Point (MPP, P_{max})

สิ่งสำคัญในการพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังต่อไปนี้ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{oc}) กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (I_{sc}) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) นอกจากนี้ยังมีค่าที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่

- อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจรเรียกว่า ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor ; FF) เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของโซลาร์เซลล์ดัง Figure 2 สามารถเขียนเป็นสมการที่ 5⁴

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (5)$$

- ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ หาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ด้านเข้า (P_{in}) สามารถเขียนเป็นสมการที่ 6⁵

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (6)$$

การสร้างแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ block ต่างๆทำงานเชื่อมโยงกันภายในโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อศึกษาผลกระทบของ 5 ตัวแปรที่สำคัญต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดัง Figure 3

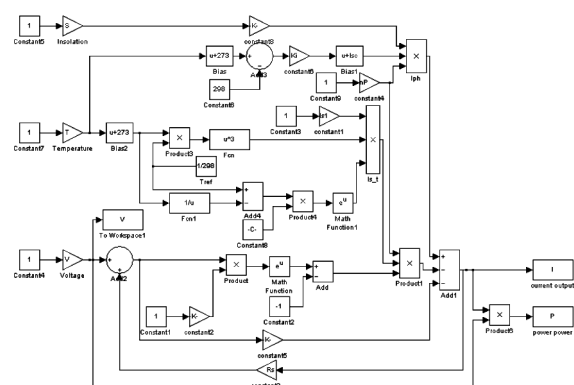


Figure 3 Simulink model of Photovoltaic cell

ในการจำลองได้ใช้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น MSX60 แบบ polycrystalline 60W โดยใช้ค่า V_{oc} เป็น 21.1V, I_{sc} เป็น 3.8A, K_I เป็น $3\text{mA}/^{\circ}\text{C}$, K_V เป็น $-73\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, Ideal factor เป็น 1.2 และ I_s เป็น 100nA ดัง Table 1

Table 1 typical electrical characteristic of MSX 60³

Solarex MSX60 Specifications (1kW/m ² , 25°C)	
Characteristics	SPEC
Typical peak power (Pp)	60 W
Voltage at peak power (Vpp)	17.1 V
Current at peak power (Ipp)	3.5 A
Short-circuit current (Isc)	3.8 A
Open-circuit voltage (Voc)	21.1 V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	-73mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current	3mA/°C
Approximate effect of temperature on power	-0.38W/°C

การจำลอง และผลการจำลองระบบ

ผลของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)

ค่า N และ I_s เป็นผลของไดโอด โดยค่า N ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับการผลิตโครงสร้างของเซลล์ เมื่อค่า N มีค่ามากขึ้นคือ 1.0, 1.5 และ 2.0 ทำให้แรงดันขาออกของเซลล์มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ FF มีค่ามากขึ้นตาม Figure 4 และ Figure 5

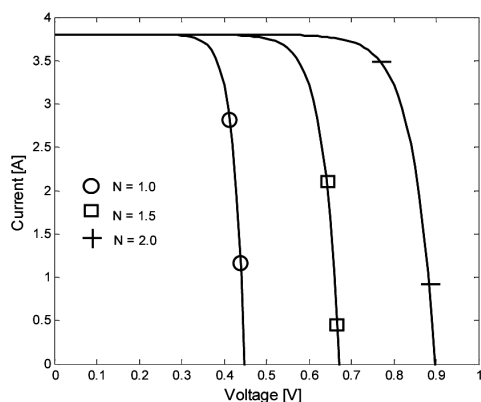


Figure 4 I-V output characteristics with varying N

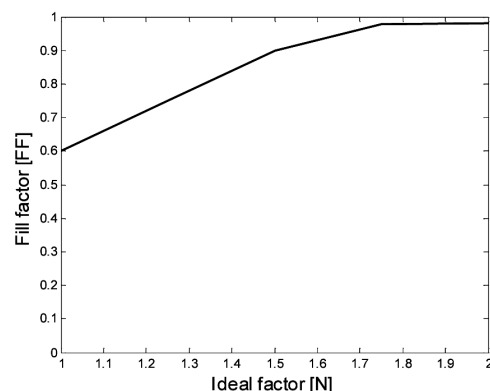


Figure 5 Ideal factor(N) vs Fill Factor(FF)

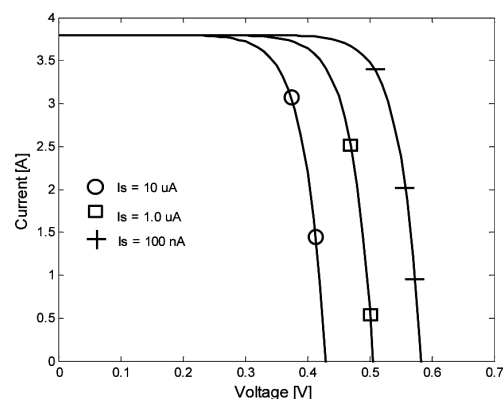


Figure 6 I-V output characteristics with varying I_s

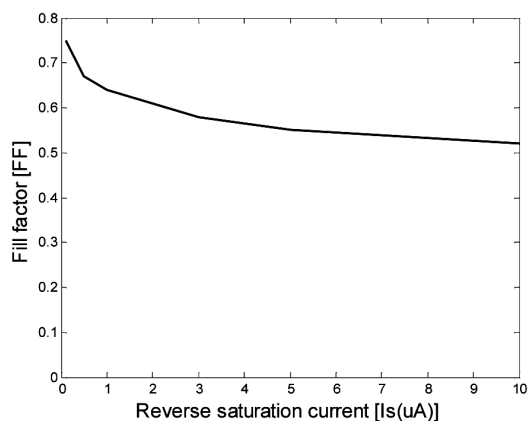


Figure 7 Reverse saturation current(I_s) vs FF.

ส่วนค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไปอัสกลับนั้น เมื่อค่า I_s มีค่ามากขึ้นคือ 100nA, 1μA และ 10μA ทำให้แรงดันขาออกของเซลล์มีค่าลดลงส่งผลให้ FF มีค่าลดลงตาม Figure 6 และ Figure 7

ผลกระทบของความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh})

ค่า R_s เป็นความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นรวมกับความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลัง จุดต่อกับขั้วภายนอก¹ เมื่อ R_s มีค่ามากขึ้นคือ 1m Ω , 0.01 Ω และ 1 Ω จะทำให้ FF มีค่าลดลงตาม Figure 8 และ Figure 9

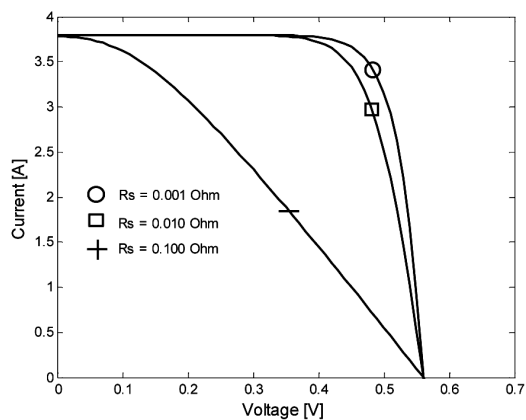


Figure 8 I-V output characteristics with varying R_s

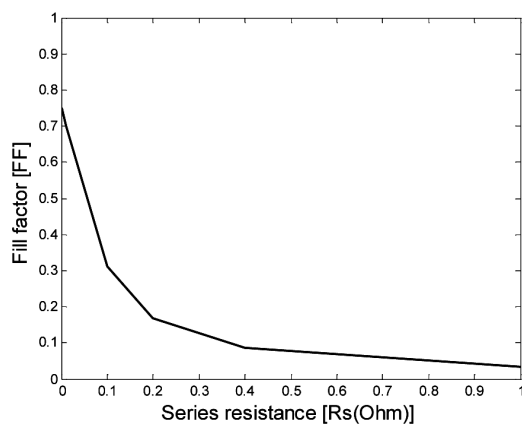


Figure 9 Series resistance (R_s) vs FF.

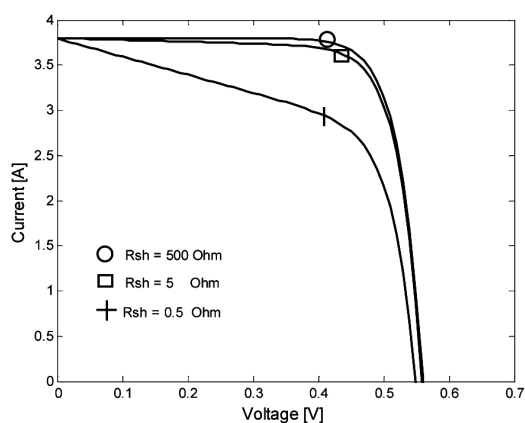


Figure 10 I-V output curve with varying R_{sh}

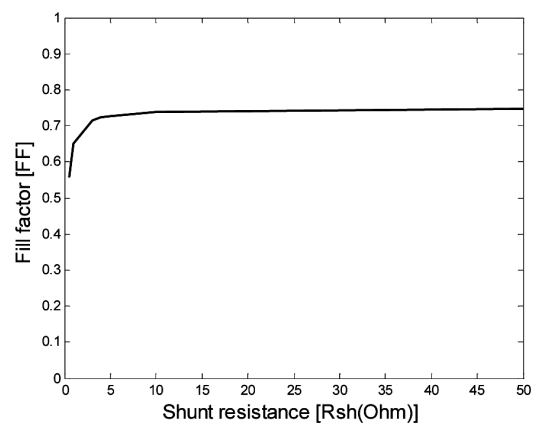


Figure 11 Shunt resistance (R_{sh}) vs FF.

ส่วนค่า R_{sh} นั้นเป็นการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ PN junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วนโดยเฉพาะบริเวณใกล้กับขอบของเซลล์¹ เมื่อ R_{sh} มีค่าลดลงคือ 50 Ω , 5 Ω และ 0.5 Ω ทำให้ FF มีค่าลดลงตาม Figure 10 และ Figure 11

ผลของความเข้มแสง (radiation intensity) และ อุณหภูมิ (Cell Temperature)

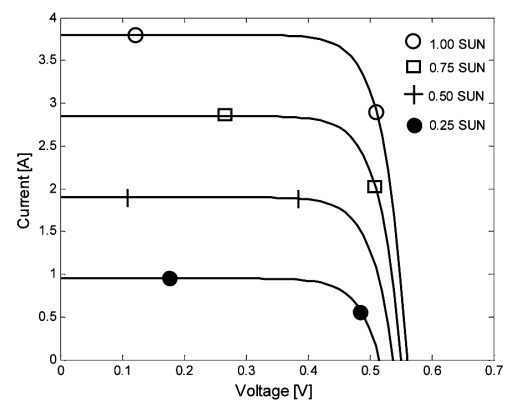


Figure 12 I-V output curve with varying I

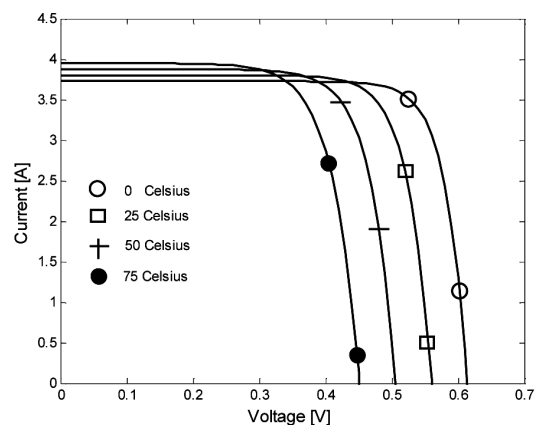


Figure 13 I-V output curve with varying T

ความเข้มแสงเป็นตัวแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนด I_{sc} เป็น 3.8A ที่ STC ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสงเป็น 1.00sun, 0.75sun, 0.50sun และ 0.25sun ($T = 25^\circ\text{C}$) ได้ผล I-V curve ตาม Figure 12 ส่วนอุณหภูมิของเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหุประจุในเซลล์ลดลง จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน P-N มีพลังงานในการเคลื่อนที่ จึงทำให้กระแสไฟฟ้าลดลงตามแต่ไม่มากนักในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าอุณหภูมิ 0°C , 25°C , 50°C และ 75°C ($I = 1000 \text{ W/m}^2$) โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันขาออกจะลดลงได้ผล I-V curve ตาม Figure 13

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

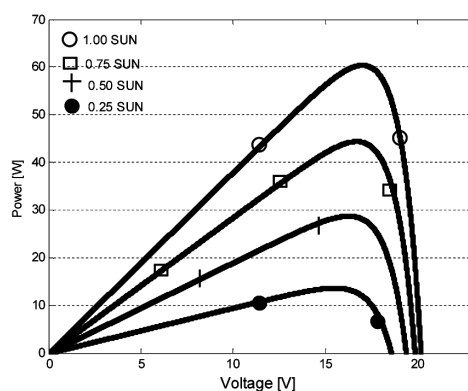


Figure 14 P-V Curve of PV Module

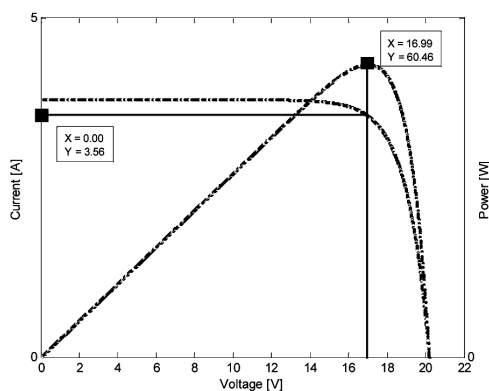


Figure 15 Maximum power point of PV module

การเพิ่มพิกัดขนาดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมและสะดวกในการใช้งานทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานและอนุกรมกัน ในการจำลองได้นำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์ จำนวนทางขนานเป็น 1 ได้ผล P-V curve ตาม Figure 14 และ Figure 15 โดย Table 2 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น MSX 60 พบว่ามีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เชื่อมต่อการจำลองอินเทอร์เฟซเพื่อสร้างสัญญาณจริงต่อไป

Table 2 Error of PV module model

	MSX-60	Simulation	Error
P_m (W)	60.0	60.46	0.77%
V_m (V)	17.1	16.99	0.64%
I_m (A)	3.5	3.56	1.71%

การเชื่อมต่อการอินเทอร์เฟซ

จากการจำลองพบว่านอกจากปัจจัยด้านราคาของระบบ PV Module ที่สูงแล้วการขาดความรู้ความเข้าใจในคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยยังต่ำเมื่อเทียบกับต่างประเทศ ดังนั้นจึงนำ dSPACE DS1104 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลที่มีประสิทธิภาพสูงมาเชื่อมต่อกับแบบจำลองของ PV Module ที่สร้างขึ้นโดยใช้ Real-time Library ซึ่งเป็น blocksets ที่ใช้หลักการของ Digital to Analog Converter เพื่อทำให้เป็นสัญญาณจริงในรูปแบบทันเวลา จากนั้นสัญญาณจาก dSPACE DS1104 จะไปควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ Delta Elektronika Power Supply (SM52-30) ไปสู่โหลด ตาม Figure 16

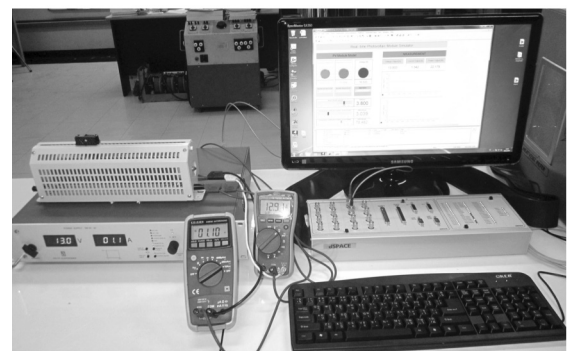


Figure 16 Consists of Photovoltaic Simulator

การใช้โปรแกรม Control Desk เพื่อควบคุมสัญญาณในรูปแบบทันเวลา โดยสามารถปรับค่าความเข้มแสงอุณหภูมิ, จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมและขนาน, ค่า Ideal factor, สัมประสิทธิ์อุณหภูมิขณะลัดวงจร, สัมประสิทธิ์อุณหภูมิขณะเปิดวงจร ซึ่งสามารถดูผลตอบสนองของค่าแรงดัน-กระแสและกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV Module เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ PV Module ข้างต้นได้ ในขณะเดียวกันค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ Power Supply ก็เปลี่ยนไปด้วยตามการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ PV Module ที่ Control Desk ดัง Figure 17

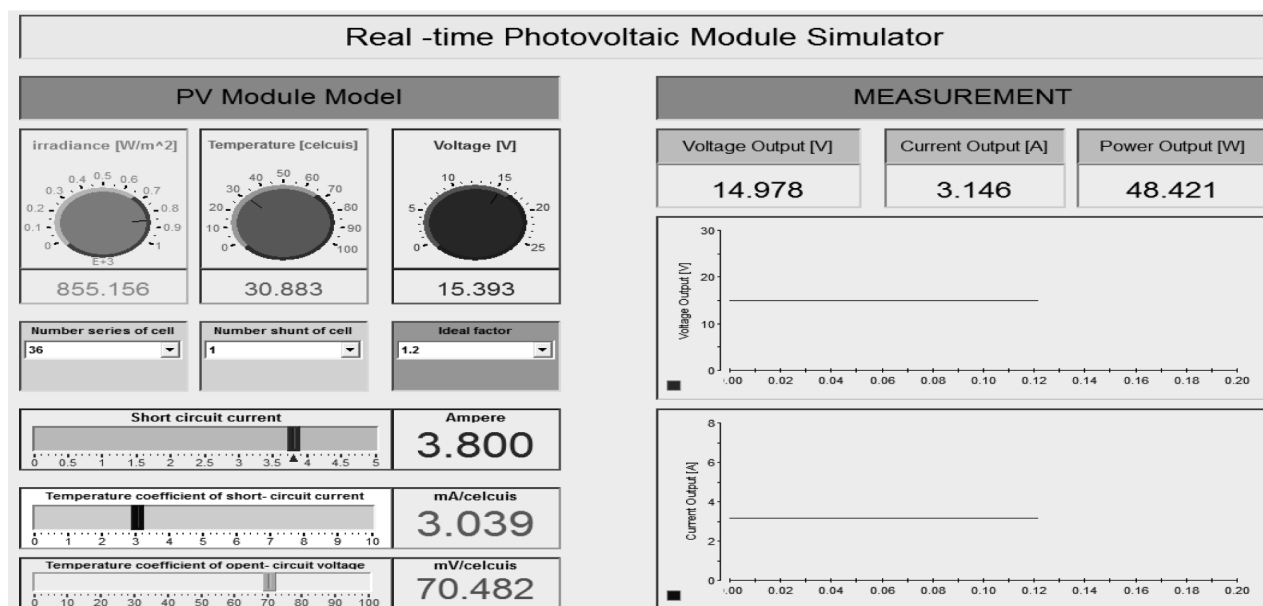


Figure 17 Real-time Photovoltaic Simulator with Control Desk program

วิจารณ์และสรุปผล

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink พบว่าค่า N ที่มากขึ้นทำให้ค่า FF สูงขึ้น ค่า I ที่มากขึ้นทำให้ค่า FF ต่ำลง นอกจากนั้นแล้วค่าผลของไดโอด (N, I_s) มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกของโซลาร์เซลล์ด้วย ค่าความต้านทาน R_s ที่มีค่ามากขึ้นมีผลต่อค่า FF ที่ลดลง และค่าความต้านทาน R_{sh} ที่น้อยลงทำให้ค่า FF ลดลงด้วยส่งผลให้เซลล์ทำงานได้ไม่ถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งค่า FF ที่ดีควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับค่าความเข้มแสงจะเป็นตัวกำหนดกระแสขาออกของโซลาร์เซลล์ถ้าความเข้มแสงน้อยกระแสขาออกก็จะต่ำลงด้วย อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง สำหรับการเชื่อมต่อในรูปแบบทันเวลาโดยควบคุมผ่านโปรแกรม Control Desk นั้นมีความสะดวกเนื่องจากคอมพิวเตอร์ DSP Code เพียงครั้งเดียวจะได้ไฟล์ตัวแปรซึ่งสามารถนำไปใช้กับ Control Desk เพื่อการควบคุมแบบทันเวลาได้เลย หากไม่ใช้ Control Desk เมื่อมีการแก้ไขค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ใน Simulink จะต้องคอมไพล์ใหม่ทุกครั้งทำให้เสียเวลาในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

1. บุญยัง ปลั่งกลาง. PHOTOVOLTAIC SYSTEMS. กรุงเทพฯ: ทริปเพิล เอ็ดดูเคชั่น; 2553.
2. Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri. Matlab/ simulink based of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT 2010;1(3):487-500.
3. Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. In: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science; 2008 October 22-24; San Francisco; 2008
4. Francisco M. Gonzalez-Longatt. Model of Photovoltaic Module in Matlab. In: II CIBELEC; 2005
5. Pilin Junsangsri, Fabrizio Lombardi. Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model. In: International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems; 2010. p. 240-248.