การออกแบบและวิเคราะห์วงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

Design and Analysis of a Solar Cell Simulator Circuit

เอก เอื้อตระการวิวัฒน์* ชัยวุฒ ชูรักษ์** วิจิตร กิณเรศ*

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์วงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม OrCAD ที่ให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าและการตอบสนองตามสภาพแวดล้อม (ความเข้มแสงและอุณหภูมิ) ที่ใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 7.71 mW และเอาท์พุทที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าขนาด 21 W ผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ให้พิกัดสูงขึ้นโดยขยายจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ซึ่งคุณลักษณะทางไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองตามความเข้มแสงและอุณหภูมิเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงในสภาวะการทำงานปกติและในสภาวะที่เกิดการบังเงาขึ้นบนเซลล์ ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เหมาะสมกับการนำไปใช้ทดสอบความถูกต้องของกระบวนการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ: การติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด, วงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

This paper presents design and analysis of a solar cell simulator circuit using OrCAD program. The simulator has electrical characteristic and environmental response (insolation and temperature) similar to a 7.71 mW solar cell. The output of the small solar cell module is used for a reference signal applied to the simulator providing 21 W solar cell characteristics. Results of the simulation exhibit higher electrical characteristic rating magnified from the small solar cell model. The obtained electrical characteristics illustrate the response of the isolation and temperature as same as that of the reference solar cell under normal and shading operation. Simulation results show that the simulator circuit is suitable to be applied to a test of the correctness of maximum power point tracking for an electricity generation system from solar cells.

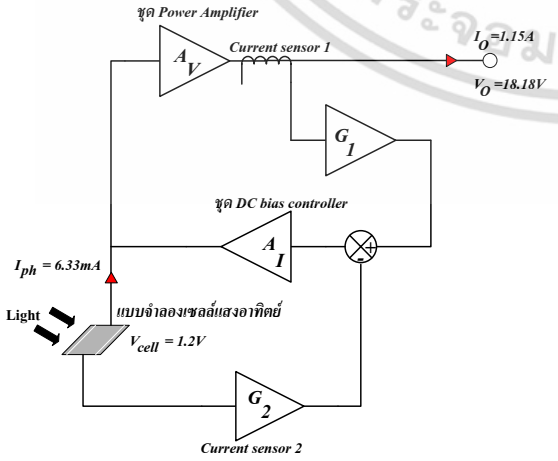
Key words: Maximum power point tracking, Solar cell simulator circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

จากผลกระทบของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา[1] จึงมีการวิจัยและศึกษาเพื่อสร้างวงจรที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและอุณหภูมิได้เช่นเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ซึ่งงานวิจัยโดยทั่วไปมุ่งเน้นในการทดสอบอินเวอร์เตอร์หรือคอนเวอร์ที่ใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่ [2, 3] ซึ่งยากในการนำไปใช้งานจริงในกรณีที่จำลองการเกิดเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์

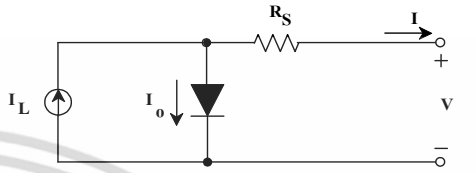
บทความนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม OrCAD 9.1 จำลองการทำงานของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1 ซึ่งวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดสอบกระบวนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) ที่มีการใช้งานในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนออาศัยชุดPower Amplifier (A_V) ในการขยายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงและสามารถจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น โดยวงจรควบคุมจุดทำงานจากชุดDC bias controller (A_I) ซึ่งมีตัวตรวจจับกระแสเอาท์พุท (current sensor 1) และตัวตรวจจับกระแสเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง (current sensor 2)



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้วงจรสมมูลที่ประกอบด้วยไดโอดตัวเดียวและความต้านทานอนุกรมเท่านั้น ส่วนความต้านทานขนานจะมีค่าสูงมากจึงไม่นิยมมาใช้ในวิเคราะห์ [4] ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

$$I = I_L - I_o\left[e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1\right] \quad (1)$$

เมื่อ I_L คือ ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโต้

V_T คือ Thermal Voltageของไดโอด

V คือ แรงดันเอาท์พุทของวงจรสมมูล

I_o คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด

I คือ ค่ากระแสเอาท์พุทของวงจรสมมูล

n คือ ค่า Ideality factor ของไดโอด

สัญญาณอ้างอิงให้แบบจำลองเนื่องจากกระแสโฟโต้มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงจึงสามารถเขียนสมการได้ดังนี้ [5]

$$I_L = \frac{I_{SCM}}{1000} \times V_irradiance \quad (2)$$

เมื่อ I_{SCM} คือกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$V_irradiance$ คือ ค่าความเข้มแสง

ในสภาวะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดน้อยมากอันเนื่องมาจากความต้านทานอนุกรมมีค่าต่ำ จึงสามารถกำหนดให้กระแส $I_L = I_{SC}$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ (1)

$$I = I_{SC} - I_o\left[e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1\right] \quad (3)$$

ซึ่งภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบด้วบเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆเซลล์มาต่อขนานเมื่อต้องการกระแสสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือมีการต่ออนุกรมเมื่อต้องการแรงดันที่สูง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_M = N_P I \quad (4)$$

$$I_{SCM} = N_P I_{SC} \quad (5)$$

$$V_M = N_S V \quad (6)$$

$$V_{OCM} = N_S V_{OC} \quad (7)$$

$$R_{SM} = \frac{N_S}{N_P} R_S \quad (8)$$

เมื่อ V_{OC} คือ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

I_{SC} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

R_S คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

M คือค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

N_S คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมภายในแผง

N_P คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนานภายในแผง

นำสมการที่ (4), (5), (6), (7), (8) แทนค่าในสมการที่ (3)

$$I_M = I_{SCM} - N_P I_o (e^{\frac{V_M + I_M R_{SM}}{n N_S V_T}} - 1) \quad (9)$$

ในสภาวะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าในสมการที่ (3) กระแส $I = 0$ ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านไดโอดเท่านั้น ดังแสดงให้เห็นในสมการ

$$I_O = \frac{I_{SC}}{(e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}} - 1)} \quad (10)$$

นำสมการที่ (5), (7) แทนในสมการที่ (10) ได้ดังนี้

$$I_O = \frac{I_{SCM}}{N_P (e^{\frac{V_{ocM}}{nV_T N_s}} - 1)} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) ส่งผลให้ค่าV_{OC}เกิดจากการแทนค่าจากสมการที่ (4), (5), (6), (7), (8) ดังแสดงในสมการ

$$v_{OC} = \frac{V_{OC}}{nV_T} = \frac{V_{OCM}}{N_S nV_T} \quad (12)$$

พารามิเตอร์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{\max M} = FF_M (1 - r_{SM}) V_{OCM} I_{SCM} \quad (13)$$

เมื่อ $P_{\max M}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผง

FF_M คือ ค่าFill Factor ของแผง

แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้ามีผลจากความต้านทานอนุกรมที่เกิดขึ้นภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในสมการ ดังนั้นค่าความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (r_{SM}) หาได้จากสมการที่ 14

$$r_{SM} = \frac{V_{OCM}}{I_{SCM}} - \frac{P_{\max M}}{FF_M I^2_{SCM}} \quad (14)$$

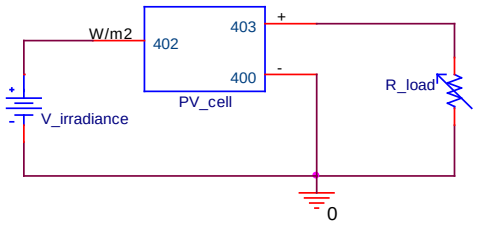
เมื่อ FF_M สามารถหาได้จาก

$$FF_M = \frac{v_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{1 + v_{OC}} \quad (15)$$

แบบจำลองสร้างจากสมการที่ (2), (11), (12), (15) ซึ่งสามารถเขียนด้วยโปรแกรม OrCAD ได้ดังนี้

```
subckt module_1 400 403 402 params:
tr=25,iscm=6.73m,
pmaxm=7.71m, vocm=1.71, ns=1, np=1, nd=1
.girradm 400 401 value={(iscm/1000*v(402))}
d1 401 400 diode
.model diode d(io={iscm/(np*exp(vocm/(nd*ns*(8.66e-
5*(tr+273))))-1)},n={nd*ns})
.func uvet() {8.61e-5*(tr+273)}
.func vocnorm() {vocm/(nd*ns*uvet)}
.func rsm() {vocm/(iscm)pmaxm*(1+vocnorm)/
(iscm*2*(vocnorm-+log((vocnorm)+0.72)))}
rs 401 403 {rsm()}
.ends module_1
```

จากโปรแกรมสามารถแบบจำลองการทำงานได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เพียง 1 เซลล์เท่านั้น โดยแบบจำลองอาศัยข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 1



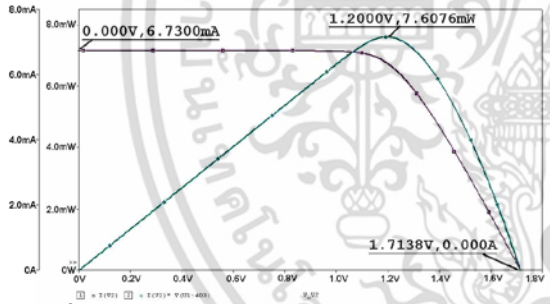
รูปที่ 3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม OrCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

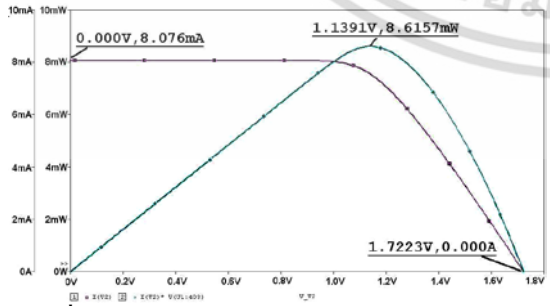
ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการวัดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะความเข้มแสง 1000W/m^2 อุณหภูมิ 25 $^\circ$ C

พารามิเตอร์ที่สนใจ	ข้อมูลที่ได้จากการวัด
แรงดันเปิดวงจร (Vocm)	1.71 V
กระแสลัดวงจร (Iscm)	6.73 mA
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax)	7.71 mW

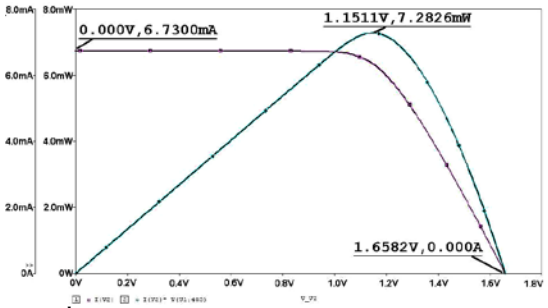
ผลการจำลองในรูปที่ 4 พบว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณลักษณะทางไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงข้อมูลในตารางที่ 1 และสามารถเปลี่ยนตามสภาวะแวดล้อมได้โดยจำลองการทำงานที่ความเข้มแสง 1200 W/m^2 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 8.076 mA ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแบบจำลองเป็น 35 $^\circ$ C แบบจำลองมีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรลดลงเป็น 1.6582 V ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในรูปที่ 4 เกิดจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้สร้างlibraryไม่มีการวิเคราะห์ถึงชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 25 $^\circ$ C

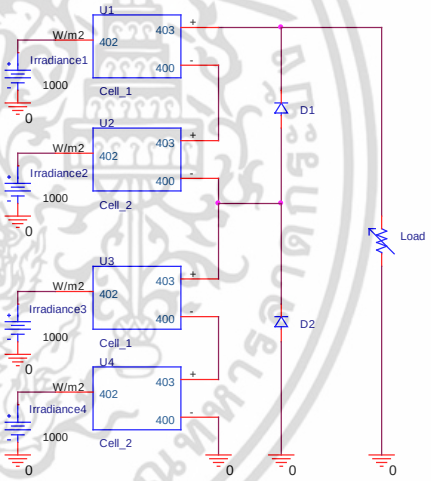


รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1200 W/m^2 อุณหภูมิ 25 $^\circ$ C

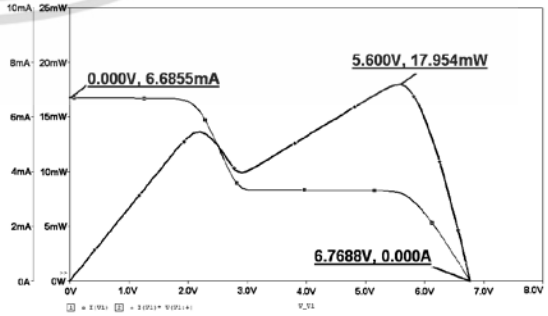


รูปที่ 6 ผลการจำลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 35 $^\circ$ C

จากการศึกษาการต่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมซึ่งมีการต่อบายพาสไดโอด [6] ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเกิดการบังเงาที่เซลล์ผลที่เกิดจากการต่อบายพาสไดโอดจะทำให้คุณลักษณะทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นสภาวะการบังเงาที่เกิดขึ้นบน cell_1และcell_2 ของรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ต่อแบบอนุกรมกรณีมีบายพาสไดโอด



รูปที่ 8 ผลการจำลองสภาวะเกิดการบังเงาบนcell_1และcell_2ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 อุณหภูมิ 25 $^\circ$ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การจำลองการทำงานของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3 สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการจำลองการทำงานของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ [7] ในรูปที่ 9 ได้โดยการออกแบบวงจรไบอัสกระแสตรง (A_i) ซึ่งคำนวณได้จาก

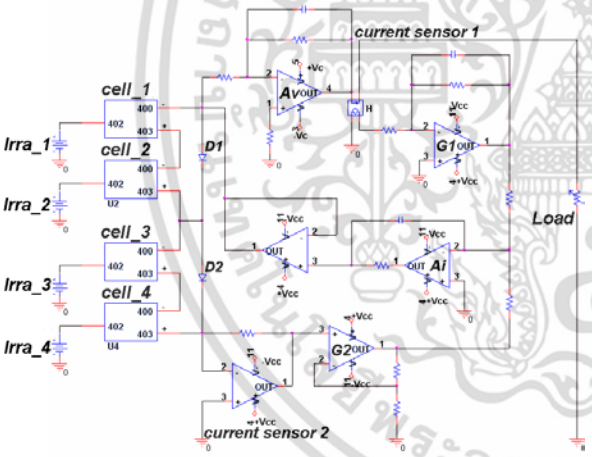
$$A_I = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_2}{G_1} \quad (16)$$

กำหนดให้ $$G_1 = \frac{V_{sensor1}}{I_O} \quad (17)$$

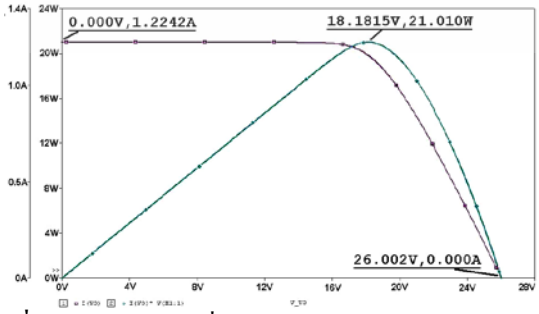
$$G_2 = \frac{V_{sensor2}}{I_{ph}} \quad (18)$$

เมื่อ I_O คือกระแสเอาท์พุทของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือกระแสเอาท์พุทจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

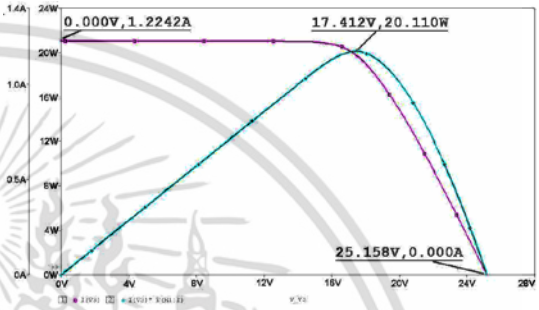


รูปที่ 9 วงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 21 วัตต์ ด้วยโปรแกรม OrCAD 9.1



รูปที่ 11 ผลการจำลองที่ความเข้มแสง 1200 W/m^2 อุณหภูมิ 25° C ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 10 ผลการจำลองที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 25° C ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

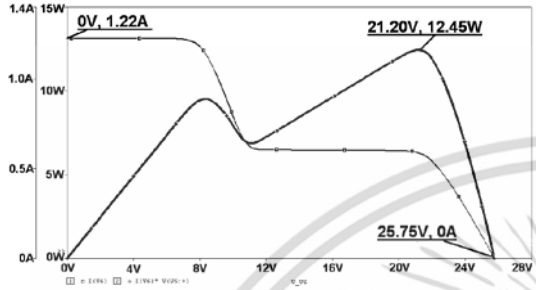


รูปที่ 12 ผลการจำลองที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 35° C ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

แบบจำลองในรูปที่ 9 เป็นแบบจำลองวงจรที่ได้ออกแบบให้มีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร 15.20 เท่าของแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์และอัตราขยายกระแสลัดวงจร 45.20 dB ทำให้แบบจำลองสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 21 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร 26โวลท์ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 1.22 แอมป์ จากการออกแบบพบว่าชุด Power amplifier มีขีดจำกัดในการทนกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำ โดยผลการจำลองการทำงานที่สภาวะความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 25° C แสดงให้เห็นในรูปที่ 10 เมื่อเพิ่มความเข้มแสง (V_irradiance) ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เป็น1200 W/m^2 ทำให้กระแสลัดวงจรของแบบจำลองเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอ้างอิงของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (พารามิเตอร์ tr ใน library รูปที่ 3) เป็น35° C แรงดันเปิดวงจรจะลดลง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 12 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบอัตราขยายให้เห็นได้ดังตารางที่ 2, 3 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เกิดสภาวะการบังเงาขึ้นดังรูปที่ 8 วงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถขยายคุณลักษณะทางไฟฟ้าได้ตามลักษณะการบังเงาดังแสดงในรูปที่ 13 จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้ามีขีดจำกัดขึ้นอยู่กับพิกัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุด Power amplifier ในขณะที่การปรับอัตราขยายสามารถปรับเพิ่มหรือลดได้ที่ชุด Current sensor 2 แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการกำหนดอัตราขยาย G1 และ G2 ด้วย



รูปที่ 13 ผลการจำลองสภาวะการเกิดเงาบังบน cell_1และ cell_2ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 อุณหภูมิ 25 $^\circ$ C

ตารางที่ 2 อัตราขยายกระแสลัดวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มแสง

ความเข้มแสง (W/m^2)	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)		
	I_{ph}	I_o	A_I (dB)
1200	0.00807	1.4700	45.20
1000	0.00673	1.2242	45.196

ตารางที่ 3 แสดงอัตราขยายแรงดันเปิดวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ

อุณหภูมิ ($^\circ$ C)	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)		
	V_{cell}	V_o	A_V
35	1.6582	25.158	15.17
25	1.7138	26.002	15.17

4. สรุปผลการจำลอง

การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OrCAD 9.1 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่มีผลตอบสนองตามความเข้มแสงและอุณหภูมิซึ่งใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 7.60 mW (1.2 V, 6.33 mA) โดยเอาท์พุทที่ได้จากการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการจำลองวงจรที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 21 W (18.18 V, 1.15 A) ซึ่งผลการจำลองสามารถใช้วิเคราะห์การออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการทดสอบกระบวนการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] เอก เอื้อตระการวิวัฒน์, วิฒิชัย ชูรักษ์, วิจิตร กิณเรศ, วีระ ธันยาภิรักษ์, “การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้อง” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 74, กรกฎาคม 2549.

[2] Guillermo Martin-Segura, Joaquim Lopez-Mestre, Miquel Teixido-Casas, Antoni Sudria-Andreu, “Development of a Photovoltaic Array Emulator System based on a Full-Bridge Structure,” Proceeding of 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, pp1-6, October 2007.

[3] Kame Khouzam, Keith Hoffman, “Real–Time Simulation of Photovoltaic Module”, Solar Energy, Vol.56, No.6, pp.521-526, 1996.

[4] เอก เอื้อตระการวิวัฒน์, วิฒิชัย ชูรักษ์, วิจิตร กิณเรศ, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแบบจำลองแหล่งไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้อง,” วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, หน้า 18-23, 2549.

[5] Luis Castaner, Santiago Silvestre, “Modelling Photovoltaic Systems using PSpice,” John Wiley & Sons Ltd., 2002.

[6] S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder, “Study of bypass diodes configuration on PV modules,” Applied Energy Solar, pp1-9, 2009.

[7] Hiroshi Nagayoshi, “I-V curve simulation by multi-module simulator using I-V magnifier circuit,” Solar Energy Materials & Solar cells, pp159-167,2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้