

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยการเชื่อมต่อโปรแกรม  
MATLAB/SIMULINK แบบทันเวลา

REAL-TIME PHOTOVOLTAIC MODULE USING  
MATLAB/SIMULINK INTERFACING

เดชนิติธร อิมปรีดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยการเชื่อมต่อโปรแกรม  
MATLAB/SIMULINK แบบทันเวลา

เดชนิตธร อัมปรีดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยการเชื่อมต่อโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แบบทันเวลา
ชื่อ-นามสกุล	นายเชชนิติธร อัมปริศา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ แต่เนื่องจากราคาของระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ยังค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดปัญหาในการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาระบบควบคุมการแปลงผันกำลังไฟฟ้า เพื่อให้สามารถใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอ การออกแบบและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนแรกเป็นการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรุ่น MSX-60 ของบริษัท SOLAREX จำกัด ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นๆ ส่วนที่สองเป็นการออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีความถี่สวิตซ์ซึ่ง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ พร้อมทั้งการเชื่อมต่อสัญญาณผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 เพื่อให้วงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้สอดคล้องกับคุณสมบัติการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า ค่าประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสง ค่าองค์ประกอบอุณหพลศาสตร์ของไดโอด และค่าความต้านทานขนานภายในเซลล์ แต่จะแปรผกผันกับค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับของไดโอด ค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ และอุณหภูมิของแผงเซลล์ ในส่วนของผลการทดสอบระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา พบว่าสามารถให้ค่าแรงดันขาออก และกระแสขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้สอดคล้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ โดยที่ค่าความเข้มแสง  $500\text{W/m}^2$  ขณะอุณหภูมิ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากวงจรทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองประมาณร้อยละ 1.63

คำสำคัญ : แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ความเข้มแสง อุณหภูมิ บอร์ดอินเทอร์เฟส

<b>Thesis Title</b>	Real – Time Photovoltaic Module Using MATLAB/SIMULINK Interfacing
<b>Name – Surname</b>	Mr. Datnitiorn Impreeda
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

The Photovoltaic (PV) system is a highly popular renewable energy source due to their energy-friendly environment. Due to their high costs, it may cause the difficulties in development and experiments of laboratory photovoltaic converter systems.

This thesis presents a design and build of a real time PV modeling. It comprises in two major parts. The first part is a mathematical modeling of a MSX-60 series of the PV cell from SOLAREX Inc. using MATLAB/SIMULINK program. It utilize into a studying of a characteristics of the PV cell and the effects of any variables to the behavior of the PV itself. The second part is to build a DC buck converter, which is 10 kHz. Switching frequency, the converter can provide a suitable output voltage and current according to a PV that modeled in MATLAB/SIMULINK program to a practical works using a proper interfacing board, such as DS1104.

The simulation results of the PV model shows that the efficiency of the PV varies on its photo generation current, which is depended directly to the solar irradiance, an ideality factor of the diode and the internal shunt resistance parameters of the PV. In another ways, the efficiency is also depended inversely with a reverse saturation current, an operation temperature and the internal series resistance of the PV. Nevertheless, the experimental test shows that the output voltage and current of such real time PV module based DC Converter is quite good and adequate correct according to the operating characteristics of the prototype PV cell. The experimental is tested under the solar irradiance at  $500\text{W/m}^2$ , temperature  $25^{\circ}\text{C}$ , which is found that the error of maximum power point is about 1.63% compare to the simulation results.

**Keywords:** photovoltaic module, solar irradiance, temperature, interfacing board



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของงานด้วยการให้คำแนะนำด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภาพร พ่วงพรพิทักษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ โรงเรียนฐานเทคโนโลยีที่ได้ให้เวลาและมอบทุนสนับสนุนเพื่อพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณ คุณกุลเดชา อนุกุลภิมย์ ที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือตลอดเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เดชนิติธร อิ่มปรีดา



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.5 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน.....	22
2.8 โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	30
2.9 การ์ดอินเตอร์เฟซ dSPACE DS1104.....	34
2.10 สรุปสาระสำคัญท้ายบท.....	38
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	41



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	คุณลักษณะทางไฟฟ้าของ Solarex รุ่น MSX-60..... 44
3.2	Block ดำเนินการต่างๆ ใน Simulink ..... 45
3.3	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร ..... 49
4.1	ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ MSX – 60 ..... 67
4.2	ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 250\text{W/m}^2, T = 25^\circ\text{C}$ ) .. 69
4.3	ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 500\text{ W/m}^2, T = 25^\circ\text{C}$ ) . 73
4.4	ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 250\text{W/m}^2, T=50^\circ\text{C}$ ) .... 77
4.5	ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 500\text{W/m}^2, T = 50^\circ\text{C}$ ) .. 79



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	วงจรมุมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองด้วย โปรแกรม MATLAB.....	6
2.2	ผลการจำลองกราฟ I - V curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ .....	6
2.3	วงจรมุมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองด้วย โปรแกรม PSIM .....	7
2.4	แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง โดยใช้ DC-DC Converter.....	7
2.5	แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink .....	8
2.6	จุดเปลี่ยนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง .....	8
2.7	โครงสร้างของเซลล์ที่ทำจากซิลิคอน.....	10
2.8	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells).....	12
2.9	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells).....	12
2.10	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cell).....	13
2.11	รูปแบบการต่อของเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.12	การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I - V Curve.....	14
2.13	กราฟ I - V Curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง .....	15
2.14	กราฟ P - V Curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง .....	16
2.15	กราฟ I - V Curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง .....	18
2.16	กราฟ P - V Curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง .....	18
2.17	การหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์.....	20
2.18	วงจรมุมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	20
2.19	วงจรทอนระดับแรงดัน.....	22
2.20	การทำงานของสวิตช์ (q) .....	22
2.21	วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q นำกระแส.....	24
2.22	วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q ไม่นำกระแส .....	25
2.23	แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ (บน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (ล่าง).....	26
2.24	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก.....	29
2.25	Block Diagram พื้นฐานใน Simulink Library Browser .....	30
2.26	หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink .....	31
2.27	การเชื่อมต่อระหว่าง Block ของ Simulink.....	31

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.28	กลุ่ม Block ของ Source ..... 32
2.29	กลุ่ม Block ของ Sinks ..... 32
2.30	กลุ่ม Block ของ Math Operations ..... 33
2.31	กลุ่ม Block ของ Signal Routing ..... 33
2.32	หน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา ..... 34
2.33	การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE รุ่น DS1104 ..... 35
2.34	บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเทอร์เฟซ DS1104 ..... 36
2.35	บล็อก RTLib 1104 ..... 37
2.36	การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับ D/A ของ DS1104 ..... 38
2.37	การจำลองแบบสัญญาณจริง โดยใช้ Control Desk ..... 38
3.1	โครงสร้างส่วนประกอบของงานวิจัย ..... 40
3.2	แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ..... 42
3.3	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 43
3.4	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 46
3.5	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 47
3.6	แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน ..... 48
3.7	วงจรตรวจจับกระแสและเชื่อมต่อกับอินเทอร์เฟซการ์ด ..... 52
3.8	วงจรภาคควบคุมของวงจรทอนระดับแรงดัน ..... 53
3.9	การมอดูเลตสัญญาณพินเกี่ยวกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ..... 54
3.10	สัญญาณพัลส์ซบเกิดของไอจีบีที ที่ควิตซ์ไชเกิดเป็น 0.53 ความถี่สวิตซ์ 10 kHz ..... 54
3.11	วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) ..... 55
3.12	วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าขาออก ..... 56
3.13	วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ ..... 56
3.14	แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ..... 57
3.15	รายละเอียดส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ..... 57
4.1	ผลกระทบของค่า N ต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 59
4.2	ผลกระทบของค่า N ต่อค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ..... 60

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 ผลกระทบของค่า IS ต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์.....	60
4.4 ผลกระทบของค่า IS ต่อค่าฟิลล์แฟกเตอร์.....	61
4.5 ผลกระทบของค่า RS ต่อกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	62
4.6 ผลกระทบของค่า RS ต่อค่าฟิลล์แฟกเตอร์ .....	62
4.7 ผลกระทบของค่า RSh ต่อต่อกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	63
4.8 ผลกระทบของค่า RSh ต่อค่าฟิลล์แฟกเตอร์ .....	63
4.9 ผลกระทบของค่า $\lambda$ ต่อกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	64
4.10 ผลกระทบของค่า T ต่อกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	65
4.11 ผลกระทบของค่า $\lambda$ ต่อกราฟ I - V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	66
4.12 ผลกระทบของค่า $\lambda$ ต่อกราฟ P - V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	66
4.13 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	67
4.14 วงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง .....	68
4.15 ภาคคำนวณค่าคิวตี้ไซเคิลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ภายใน DS1104.....	69
4.16 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (250W/m <sup>2</sup> , 25°C)	71
4.17 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (250W/m <sup>2</sup> , 25°C)	71
4.18 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	72
4.19 สัญญาณขั้วเกต ไอจีบีทีแบบสัญญาณจริง .....	72
4.20 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (500W/m <sup>2</sup> , 25°C)	74
4.21 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (500W/m <sup>2</sup> , 25°C)	75
4.22 สัญญาณขั้วเกต ไอจีบีทีแบบสัญญาณจริง .....	75
4.23 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน .....	76
4.24 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน .....	76
4.25 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (250W/m <sup>2</sup> , 50°C)	78
4.26 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (250W/m <sup>2</sup> , 50°C)	79
4.27 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (500W/m <sup>2</sup> , 50°C)	81
4.28 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ (500W/m <sup>2</sup> , 50°C)	81

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2553 เพิ่มขึ้นจากปี 2552 ร้อยละ 10.4 การใช้พลังงานไฟฟ้าในครัวเรือนและที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.8 ส่วนภาคธุรกิจเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.6 มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากปีก่อน ทั้งธุรกิจ กลุ่มโรงแรม ห้างสรรพสินค้า ร้านค้าปลีก ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าตามชนิดของเชื้อเพลิงนั้นร้อยละ 72.8 มาจากก๊าซธรรมชาติ [1] ส่วนหนึ่งของก๊าซที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้านั้น นำเข้าจากประเทศพม่าทำให้ขาดความมั่นคงทางระบบไฟฟ้าของประเทศ ดังนั้นแนวทางการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่หลากหลายจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อลดการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติ

กระทรวงพลังงานได้มียุทธศาสตร์พลังงานโดยกำหนดนโยบายด้านพลังงานทดแทน และให้การสนับสนุนงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเช่น ไฮโดรเจนและเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้รองรับการพัฒนาการใช้งานและการผลิตโดยทำทั้งในระดับการต่อยอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และในระดับที่คิดค้นพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่มาจากภูมิปัญญาคนไทย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ สร้างเทคโนโลยีที่เป็นของคนไทย เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตใกล้เส้นศูนย์สูตรระหว่างเส้นรุ้งที่  $5^{\circ}$  เหนือ ถึง  $22^{\circ}$  เหนือ และเส้นแวง  $96^{\circ}$  ตะวันออก ถึง  $106^{\circ}$  ตะวันออก จึงได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างมาก ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ของประเทศไทยโดยเฉลี่ยประมาณ  $18.2 \text{ MJ/m}^2$  ต่อวัน ( $5.05 \text{ kWh/m}^2$  ต่อวัน) [2] หากประเทศไทยสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ส่องลงมาบนพื้นที่ของประเทศไทยเพียงหนึ่งในร้อยส่วนของพื้นที่ทั้งหมดจะสามารถผลิตพลังงานเทียบเท่าการใช้น้ำมันดิบประมาณ 7 ล้านตันต่อปี

อย่างไรก็ตามระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีข้อเสียตรงที่ใช้ต้นทุนการผลิตและต้นทุนในการติดตั้งค่อนข้างสูง ในการทดลองนั้นมักจะมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์และอุณหภูมิที่มากขึ้นต่างกันไปในแต่ละวัน ก็ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้ สามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถจ่ายโหลดได้จริง หรือใช้เพื่อการพัฒนากระบวนการควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดความสะดวก โดยที่สามารถทดลองในช่วงเวลาใดก็ได้ อีกทั้งยังลดการใช้เครื่องมือวัดที่มีราคาสูง เช่น ไพแรนอมิเตอร์ เป็นต้น



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

1.2.2 เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.3 เพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง โดยใช้หลักการควบคุมค่าตัวตัดไซเคลของวงจรทอนระดับแรงดัน

## 1.3 สมมุติฐานการวิจัย

ในปัจจุบันการศึกษผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance) ผลของอุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) ที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น หากใช้การวัดจริงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือวัดหลายประเภท เช่น ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ใช้วัดค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ มัลติมิเตอร์ใช้วัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แผงเซลล์ ตัวต้านทานและเครื่องวัดอุณหภูมิที่แผงเซลล์ก็มีความจำเป็นในการศึกษาและวิจัย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทั้งความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์อุณหภูมิที่แผงเซลล์ แรงดันไฟฟ้าด้านนอกขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage;  $V_{OC}$ ) กระแสไฟฟ้าด้านนอกขณะลัดวงจร (Short Circuit Current;  $I_{SC}$ ) จำนวนเซลล์ที่นำมาต่อแบบขนานหรือแบบอนุกรม (Cells Parallel and Cells Series Number) และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ผลของไดโอดเป็นต้น จากนั้นพัฒนาให้เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่สามารถจ่ายโหลดได้จริง ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้สะดวกเหมาะสมสำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานหรือพัฒนาระบบควบคุมในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 60W โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

1.4.2 สร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน ซึ่งควบคุม

แรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าขาออก โดยใช้หลักการควบคุมความถี่ไซเคิลผ่านทาง การ์ดอินเทอร์เฟส (dSPACE DS1104)

1.4.3 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่ใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

## 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

### 1.5.1 ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ศึกษาการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การ เขียนในรูปแบบ M-File และการเขียนในรูปแบบ Simulink เป็นต้น

### 1.5.2 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น

- 1) ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ศึกษาคุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณความเข้มแสง ผลของ อุณหภูมิ ความต้านทาน แรงดันขณะเปิดวงจร กระแสขณะลัดวงจร และกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 3) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink วิธีการใช้งานและ การเขียนโปรแกรมเพื่อการออกแบบและวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์
- 4) ศึกษาการใช้งานการ์ดอินเทอร์เฟส (dSPACE DS1104) และวงจรแปลงผันไฟฟ้า กระแสตรง (DC to DC Converter) เพื่อการสร้างสัญญาณจริง (Real-Time) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำลอง

### 1.5.3 การจำลองและออกแบบวงจรสำหรับคุณสมบัติการจ่ายกำลังงานขาออก

- 1) กำหนดสมการตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
- 3) ออกแบบสร้างวงจรทอนระดับแรงดันและวงจรควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า
- 4) ออกแบบวงจรที่ใช้ทดสอบที่โหลดเชิงเส้น

### 1.5.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) จำลองการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 2) เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ กับคุณสมบัติของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต (Typical Electrical Characteristic of PV Module)
- 3) ทดสอบคุณลักษณะการจ่ายกระแส – แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบ สัญญาณจริงกับแบบจำลองใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### 4) ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลดแบบเชิงเส้น

1.5.5 วิเคราะห์ผลการทดลองตามผลขั้นตอนการทดลอง

1.5.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 มีความรู้ความเข้าใจในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

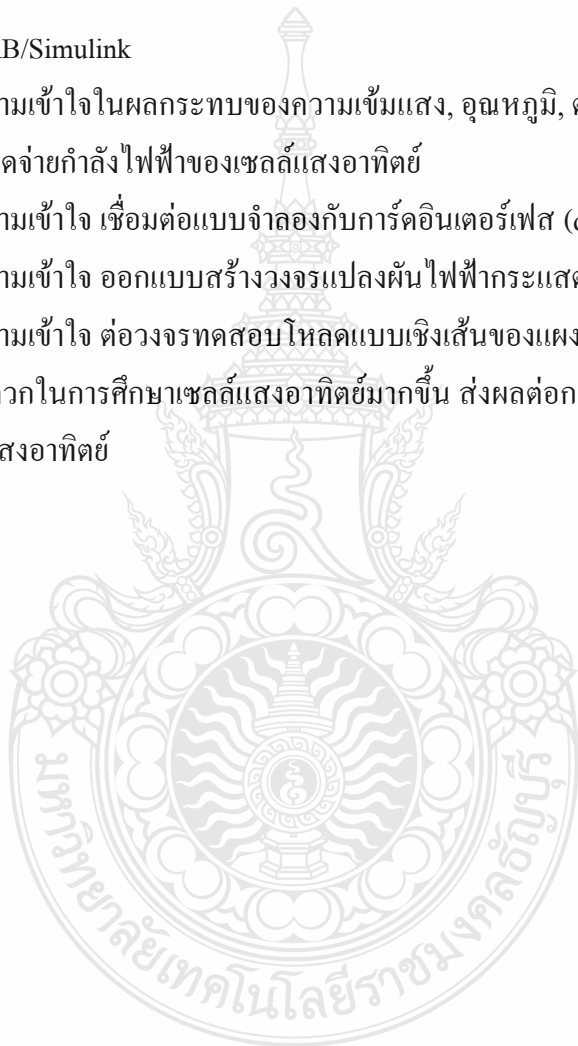
1.6.2 มีความรู้ความเข้าใจในผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรไดโอด, ตัวต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

1.6.3 มีความรู้ความเข้าใจ เชื่อมต่อแบบจำลองกับการ์ดอินเตอร์เฟส (dSPACE DS1104)

1.6.4 มีความรู้ความเข้าใจ ออกแบบสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC - DC Converter)

1.6.5 มีความรู้ความเข้าใจ ต่อวงจรทดสอบโหลดแบบเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.6.6 มีความสะดวกในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาระบบควบคุมของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



## บทที่ 2

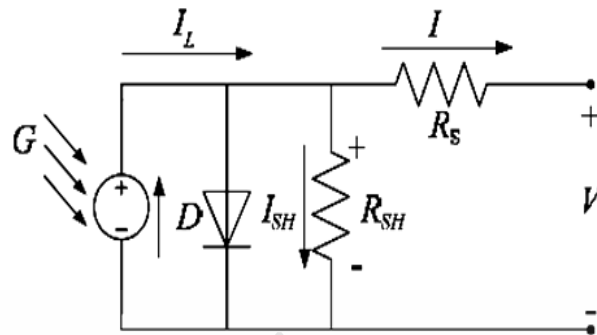
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย การทบทวนบทความ ที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์, เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรทอนระดับแรงดันและการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

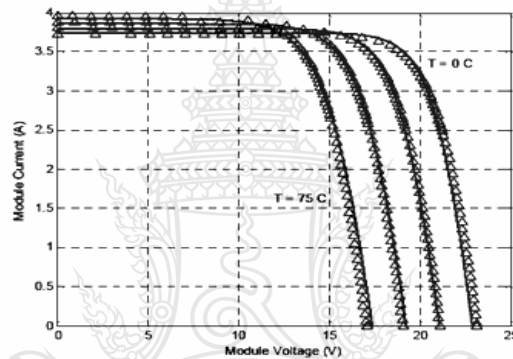
#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนบทความงานวิจัยด้านการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มีหลายงานที่นำเสนอถึงวิธีการศึกษาผลกระทบของปริมาณแสง, อุณหภูมิ และความต้านทาน ต่อคุณสมบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีในแต่ละงานต่างมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไปดังนี้

2.1.1 Model of Photovoltaic Module in MATLAB ปี 2005 โดย Francisco M. Gonzalez - Longatt [3] งานที่ได้นำเสนอคือการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัดขนาด 60 W, 36 Cell ชนิด Polycrystalline โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์แทนการทดลองในห้องปฏิบัติการ ข้อดีของงานวิจัยนี้คือสามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถจำลองกราฟกระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I - V Curve) เมื่อปริมาณความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง และกราฟ I - V Curve เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ทั้งยังได้ศึกษาผลกระทบของค่าความต้านทานอนุกรม (Series Resistance ; RS) ต่อกราฟ I - V curve และค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor ; FF) ด้วย ดังภาพที่ 2.1 และภาพที่ 2.2 ข้อด้อยในงานวิจัยชิ้นนี้คือ สามารถจำลองขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จำกัดเพียง 36 เซลล์และเป็นเพียงการจำลองในคอมพิวเตอร์ไม่ได้มีการพัฒนานำแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมาทดสอบการจ่ายโหลดจริง



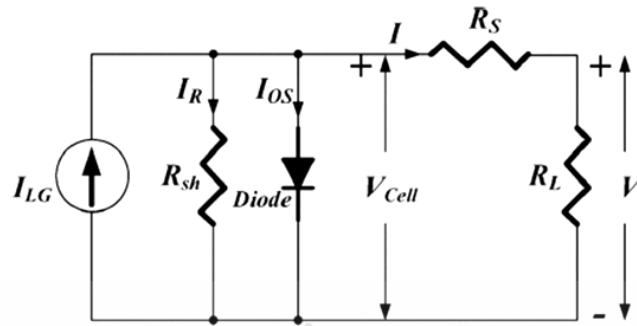
ภาพที่ 2.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



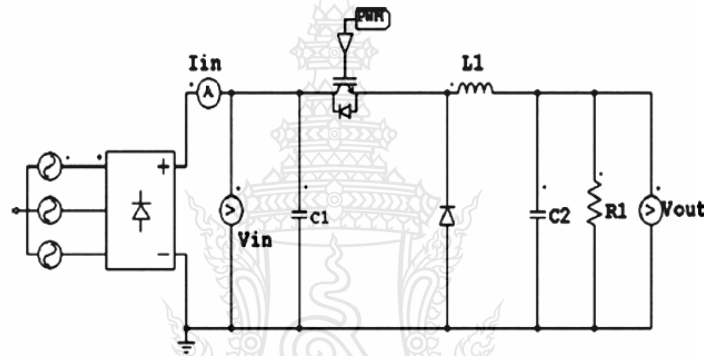
ภาพที่ 2.2 ผลการจำลองกราฟ I - V curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2.1.2 Development of Photovoltaic Simulator Based on DC - DC Converter โดย Ho Lee Min - Jung Lee, Se - Na Lee, Hwa - Chun Lee, Hae - Kon Nam, Sung - Jun Parkn [4]

Ho Lee และคณะได้นำเสนอการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม PSIM เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถหากราฟ P - I - V Curve เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงได้ ข้อดีของงานวิจัยชิ้นนี้คือ ได้แบบจำลองที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูง อีกทั้งยังมีการนำเสนอการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยวงจร DC - DC Converter เพื่อพัฒนาไปสู่การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ข้อดีในงานวิจัยชิ้นนี้คือ ไม่ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งเป็นเพียงการจำลองในคอมพิวเตอร์ ไม่ได้มีการนำมาทดสอบการจ่ายโหลดจริงดังภาพที่ 2.3 และภาพที่ 2.4



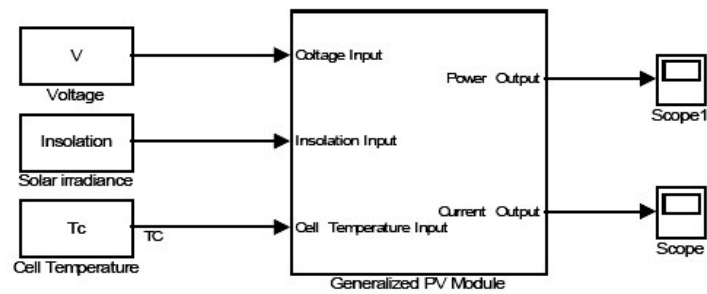
ภาพที่ 2.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM



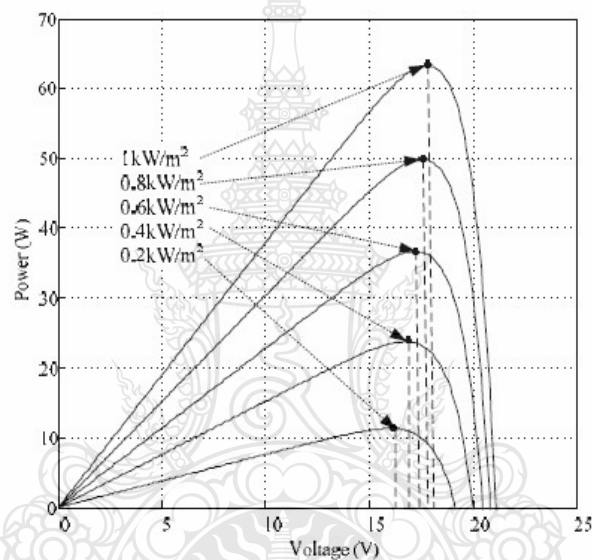
ภาพที่ 2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้ DC-DC Converter

2.1.3 Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/Simulink ปี 2008 โดย Huan - Liang Tsai, Ci - Siang Tu and Yi - Jie Su [5]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่ขนาดพิกัด 60 W จำนวน 36 Cell โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้มีการศึกษาจุดเปลี่ยนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเกิดผลกระทบในด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิ ซึ่งสามารถจำลองกราฟ I - V Curve และ P - V Curve ได้ ทั้งยังสามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ในการต่อแบบอนุกรมหรือการต่อแบบขนานได้อีกด้วย ข้อดีในงานวิจัยชิ้นนี้ คือผลการทดสอบเป็นเพียงการจำลองในคอมพิวเตอร์ไม่ได้มีการนำสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ออกมาเป็นสัญญาณจริง ดังภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพที่ 2.6 จุดเปลี่ยนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

ดังนั้นในการวิจัยนี้ขอแนะนำเสนอแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับ DC - DC Converter ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาผลกระทบที่สำคัญของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด อีกทั้งยังสามารถทดสอบการจ่ายกระแส - แรงดันไฟฟ้าตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

## 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนจากพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยคุณสมบัติสำคัญที่เรียกว่า “ผลของโฟโตโวลตาอิก” (Photovoltaic Effect) ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ Alexander Edmond Becquerel ได้สังเกตเห็นการเกิดแรงดันไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีแสงมาตกกระทบและในปี ค.ศ. 1876 ก็ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์นี้ขึ้นในสาร Selenium ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยที่ใช้สาร Selenium และสารประกอบของ Cuprous Oxide และเมื่อในปี ค.ศ. 1941 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีของการสร้างรอยต่อสาร พี-เอ็น (P - N Junction) โดยวิธีการที่เรียกว่า Grown Junction เทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนอย่างมากในการพัฒนาของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1954 กลุ่มนักวิจัยจากบริษัท Bell Telephone ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของผลึกซิลิกอนขึ้นมาเป็นผลสำเร็จ แต่ในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนาและสร้างขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพ [6] และการลดต้นทุนในตัวโครงสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงมีการขยายการใช้งานเป็นวงกว้าง เพราะเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง และไฟฟ้าที่ได้นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current; DC) ที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆ ในขณะที่ใช้งาน เพียงแค่ติดตั้งไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที และทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ขณะทำงานจึงไม่มีปัญหาด้านการสึกหรอหรือต้องการการบำรุงรักษาเหมือนอุปกรณ์การผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น ข้อเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือต้นทุนการติดตั้งสูง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่นำมาผลิต โดยทั่วไปประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์

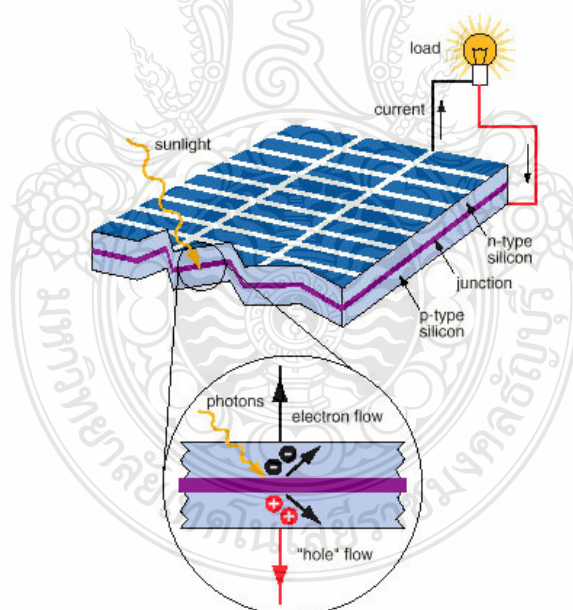
## 2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซึ่งวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลก ได้แก่ซิลิกอน ซึ่งถลุงได้จากแร่ควอตซ์และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ตลอดจนการทำให้เป็นผลึก สารซิลิกอนบริสุทธิ์ปกติจะมีความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ต่ำมากเพราะอิเล็กตรอนไม่มีการเคลื่อนที่ในบอนด์ แต่เมื่อใช้วิธีการโด๊ป (Doping) โดยสารโบรอนจะทำให้ความเป็นตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพราะโบรอนจะทำหน้าที่เป็นตัวเป็นตัวพาประจุ



(Charge Carrier) ซึ่งเป็นประจุบวกคือไม่มีอิเล็กตรอน แต่จะเป็นช่องว่างที่เรียกว่า Gaps หรือ โฮล (Holes) ซึ่งอิเล็กตรอนจะมาจับคู่ด้วยในโครงสร้างของรูปผลึกเมื่อผ่านขบวนการนี้แล้ว เรียกว่า P-Type การโด๊ปอีกแบบหนึ่งใช้สารฟอสฟอรัส (Phosphorous) สารซิลิคอนที่ผ่านขบวนการโด๊ปนี้แล้ว เรียกว่า N-Type ซึ่งหมายความว่าฟอสฟอรัสจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอิเล็กตรอนหรือประจุลบ

ซิลิคอนเกือบทั้งหมดในเซลล์แสงอาทิตย์ คือส่วนที่เป็น P-Type ในขณะที่ผิวส่วนหน้าของเซลล์ด้านที่แสงตกกระทบจะเป็นเพียงชั้นบางๆ แบบ N-Type รอยต่อที่อยู่ระหว่างชั้นทั้งสองเรียกว่า PN Junction ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์เพราะจะเป็นบริเวณที่มีประจุอิสระเคลื่อนที่ผ่าน และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นระหว่าง Junction ในส่วนของสารซิลิคอนที่เป็น N-Type นั้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ซิลิคอนส่วนที่เป็น P-Type มีส่วนที่เรียกว่า โฮล คือส่วนที่อิเล็กตรอนขาดหายไป (Electron Space) สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกัน เมื่อประจุอิสระเหล่านี้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ PN Junction จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างรอยต่อบนสารกึ่งตัวนำก็จะเกิดการผลิตประจุอิเล็กตรอนอิสระและโฮลขึ้นอย่างมากมาย การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็คือการเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง [6] ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของเซลล์ที่ทำจากซิลิคอน

ในการการผลิตเซลล์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดได้มีการปรับปรุงใน 2 ลักษณะ คือ ทำให้หน้าสัมผัสเชื่อมติดกับผิวหน้าของเซลล์เพื่อที่จะรวบรวมประจุโดยไม่มีการบดบังแสงที่มากกระทบมากนัก และสุดท้ายคือ การเคลือบสารลดการสะท้อนที่ด้านหน้าของเซลล์เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสง คุณสมบัติเด่นของสารเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนคือ สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 0.5 V มีอายุการใช้งานที่ยาวนานถ้ามีการป้องกันความชื้นที่ดี

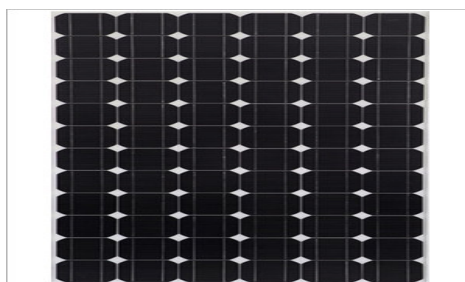
## 2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุที่นำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่วนมากจะเป็นซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอยู่มากและมีราคาถูก เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานแล้วในเชิงพาณิชย์แบ่งได้ 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

### 2.4.1 ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Mono - Crystalline) การเตรียมสารซิลิคอนชนิดนี้เริ่มต้นจากนำสารซิลิคอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.99%) มาหลอมละลายในเตา Induction Furnace ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ พร้อมใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P - Type แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวจับกันเป็นผลึกด้วย Seed ซึ่งจะตกผลึกมีขนาดหน้าตัดใหญ่ แล้วจึงดึงแท่งผลึกนี้ขึ้นจากเตาหลอมด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึกจะได้แท่งยาวเป็นรูปทรงกระบอกคุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยลวดตัดเพชร (Wire Cut) เรียกว่า เวเฟอร์ ซึ่งจะได้แผ่นผลึกมีความหนาประมาณ 300 ไมโครเมตรและขีดความเรียบของผิว จากนั้นก็นำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น PN Junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ด้วยวิธีการ Diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสออกไปใช้งานโดยที่ผิวบนจะเป็นขั้วลบ ส่วนผิวล่างจะเป็นขั้วบวก ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการเคลือบฟิล์มที่ผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสง หลังจากนั้นจะนำไปประกอบเข้าแผงโดยใช้กระจกเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์ และใช้ซิลิโคน และอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate) ช่วยป้องกันความชื้น [6]

ในการใช้งานจริงจะนำเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มากขึ้นและนำมาต่อขนานเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามต้องการ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า 15 - 17% สามารถตอบสนองในแถบความยาวคลื่นกว้าง โดยมีประสิทธิภาพดีในช่วงความยาวคลื่นยาวของแสงอาทิตย์แต่มีราคาแพง ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)

#### 2.4.2 ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม โดยวิธีนี้ จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธีแรก คือการทำแผ่นเซลล์จะใช้วิธีการหลอมสารซิลิคอนให้ละลายพร้อมใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P - Type แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อสารละลายซิลิคอนแข็งตัวก็จะได้เป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึกรวม (ตกผลึกไม่พร้อมกัน) จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นเช่นเดียวกับแบบผลึกเดี่ยว ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวมสังเกตได้จากผิวผลึก ถ้ามีโทนสีที่แตกต่างกันซึ่งจะเกิดจากผลึกเล็กหลายผลึกในแผ่นเซลล์จะเป็นแบบ

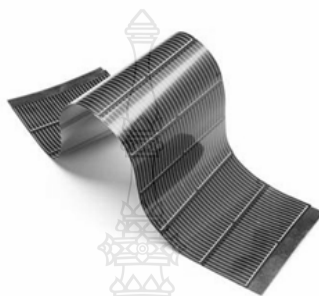
ผลึกรวม [7] ดังภาพที่ 2.9 ในขณะที่แบบผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นผลึกเนื้อเดียว คือมีสีเดียวกันตลอดทั้งแผ่นส่วนกรรมวิธีผลิตเซลล์ที่เหลือจะเหมือนกัน เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว โดยมีค่าประมาณ 12 - 15% และสามารถตอบสนองในแถบความยาวคลื่นที่กว้าง



ภาพที่ 2.9 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)

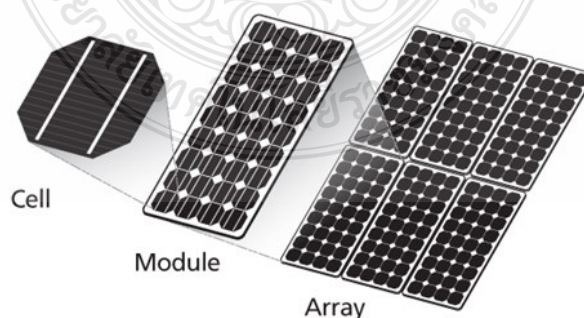
### 2.4.3 ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟิส (Amorphous Silicon Cells)

เป็นฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ามีความหนาประมาณ 0.5 – 1.0 ไมครอน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลขซึ่งมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบางเบา ราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร มีประสิทธิภาพประมาณ 6-8% [7] ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟิส (Amorphous Silicon Cell)

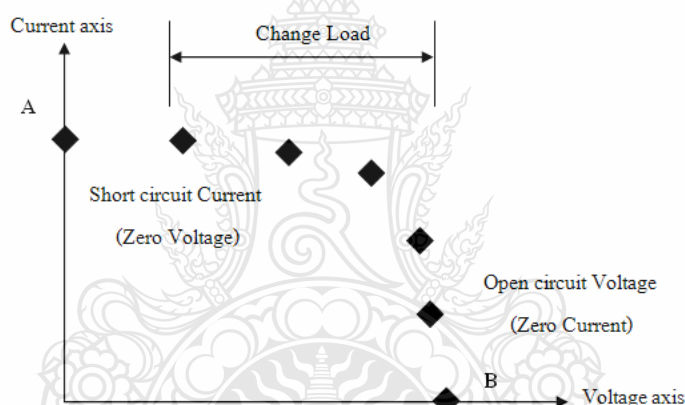
โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรประมาณ 10 – 20 mA และสามารถให้แรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิดประมาณ 0.6 - 0.7V ดังนั้นการใช้งานโซลาร์เซลล์จะไม่นำมาใช้งานเพียงเซลล์เดียว (Cell) เนื่องจากให้กำลังไฟฟ้าน้อย จึงนำเซลล์มาต่อขนานกันเพื่อให้กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น หรือถ้าต้องการแรงดันสูงก็นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน ที่เรียกว่าโมดูล (Module) และหากนำโมดูลมาต่อรวมกันอีกจะเรียกว่า อะเรย์ (Array) ซึ่งจะสามารรถให้พิกัดกำลังไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 รูปแบบการต่อของเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.5 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถแสดงได้โดยใช้ I - V Curve ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย (I) หมายถึงกระแสไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟแนวตั้ง และ (V) หมายถึงแรงดันไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟแนวนอน ที่อุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่สามารถสร้างกราฟ I - V Curve ได้โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการต่อโหลด เรียกว่า Open Circuit Voltage ( $V_{OC}$ ) จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด A จากนั้นให้เซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสจนถึงค่ากระแสสูงสุดในสภาวะลัดวงจร ที่จุดนี้จะให้ค่ากระแสสูงสุด เรียกว่า Short Circuit Current ( $I_{SC}$ ) ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่จุด B จากนั้นลากเส้นผ่านจุดทุกจุดที่ทดสอบจะเกิดเป็น I - V Curve ขึ้น [7] ดังภาพที่ 2.12



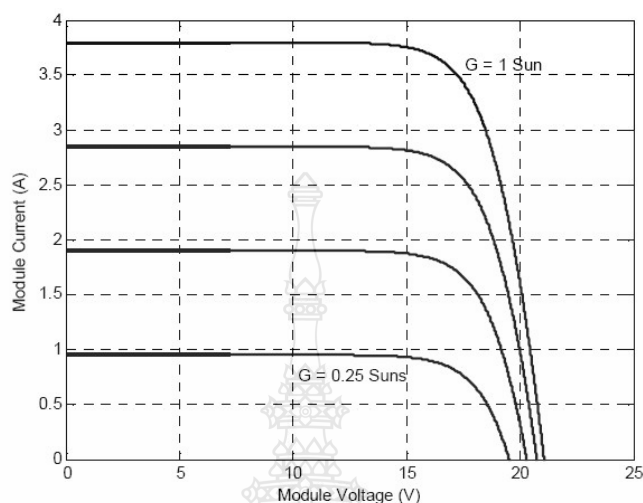
ภาพที่ 2.12 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I - V Curve

ดังนั้นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอยู่ 2 ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด คือ ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิที่แผงเซลล์ นอกจากนั้นอาจมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่มีผลกระทบ เช่น โหลดที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะการบังเงา อาจรวมไปถึงชนิดและการต่อเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.5.1 ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ตามความสัมพันธ์ของกระแสไฟโตที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าความเข้มแสงนั้นคือ หากความเข้มแสงมีค่าสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 2.13 ความเข้มแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน คือความเข้มแสงที่วัดได้

บนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆบังและวัดที่ระดับน้ำทะเลในขณะที่รับแสงจากดวงอาทิตย์ 1.5 AM และความเข้มแสงจะมีค่า  $1000 \text{ W/m}^2$



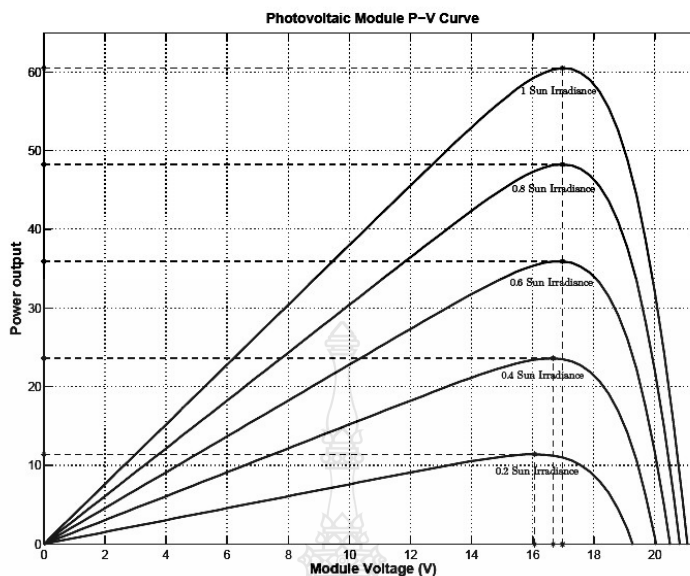
ภาพที่ 2.13 กราฟ I - V Curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง

ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตกับความเข้มแสงอาทิตย์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

[8]

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_I (T - T_{ref})] \cdot \lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ	$I_{sc}$	คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ $25^\circ\text{C}$ ; A
	$K_I$	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร; $\text{A}/^\circ\text{C}$
	$T_{ref}$	คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์; Kelvin
	$\lambda$	คือ ความเข้มแสง; $\text{kW/m}^2$



ภาพที่ 2.14 กราฟ P - V Curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง

### 2.5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ

กระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือที่ค่าอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น หากกำหนดไว้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage;  $V_{OC}$ ) ที่ 21 Volt ณ ที่ค่าอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 Volt ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 2.5% นั่นคือแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อไม่มีโหลด ลดลง 0.525 Volt จะเหลือเพียง 20.475 Volt เท่านั้น จากสมการไดโอดในอุดมคติที่บรรยายคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อพีเอ็นตลอดช่วงกว้างของกระแสและแรงดัน สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.2

$$I = I_s(t) \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ  $I_s$  คือ Cell's Reverse Saturation Current of Diode ; A  
 $V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด; V

ค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไบอัสกลับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 [8]

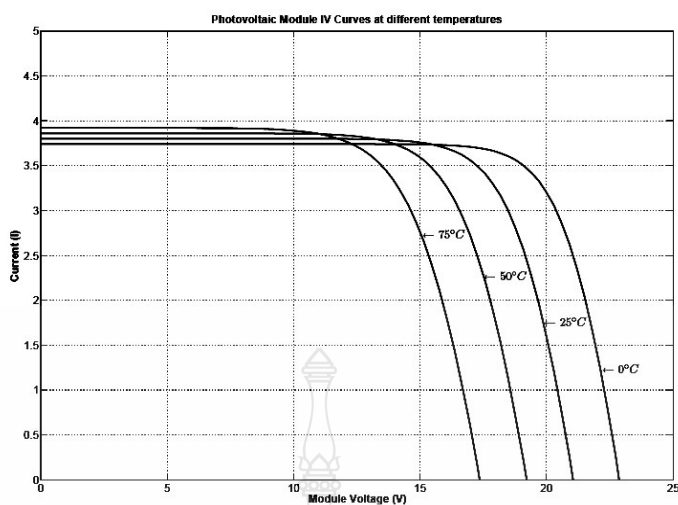
$$I_s(t) = I_s \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \left( \frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N \cdot V_t} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_g$  คือ Band Gap Energy of Semiconductor  
 $V_t$  คือ Thermal Voltage at Room Temperature  
 $T$  คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์; Kelvin  
 $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์; Kelvin  
 $N$  คือ Ideality Factor of The Diode

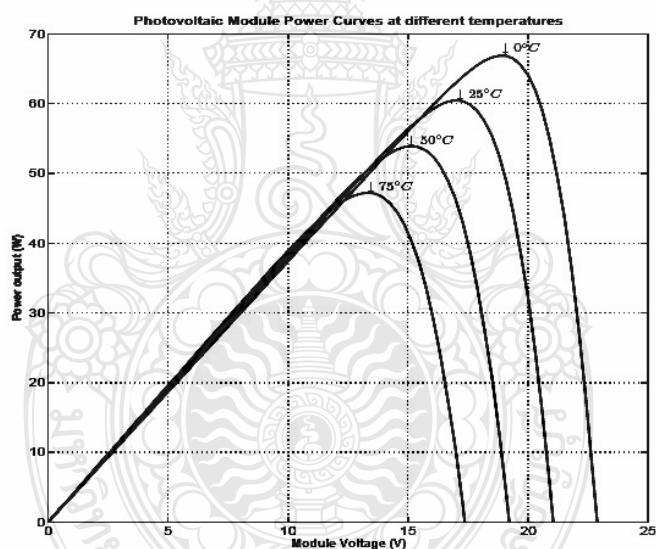
จากสมการที่ 2.3 อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง  
 ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามภาพที่ 2.15 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามภาพที่ 2.16







ภาพที่ 2.15 กราฟ I - V Curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2.16 กราฟ P - V Curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

ในการพิจารณาคูณลักษณะทางกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1) แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดขณะเปิดวงจรหรือเป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าสูงมาก โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงในรูปลอการิทึม (Logarithm)

2) กระแสขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) เป็นค่ากระแสที่วัดจากการลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือค่ากระแสของเซลล์เมื่อภาระทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ โดยที่ค่ากระแสลัดวงจรนี้จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์

3) กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{max}$ ) เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ปริมาณความเข้มของแสงที่ตกกระทบ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าหนึ่งๆ โดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

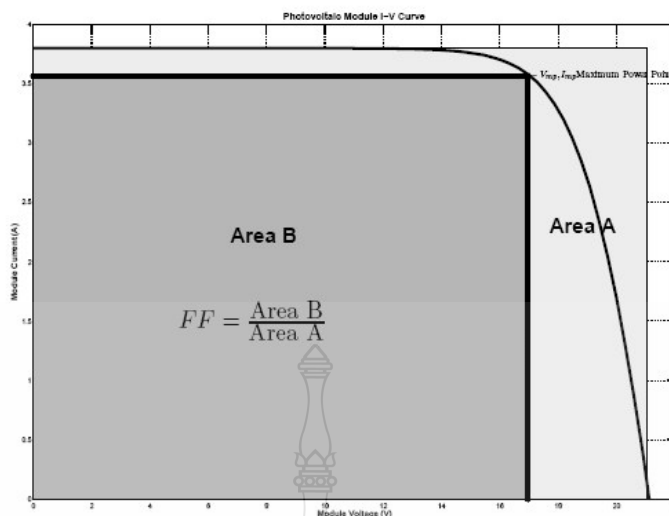
4) กระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mp}$ ) เป็นค่ากระแสที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

5) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mp}$ ) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดทางไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังงานสูงสุด

6) ฟิลล์แฟกเตอร์ (FF.) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรดังภาพที่ 2.17 ค่าฟิลล์แฟกเตอร์เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของโซลาร์เซลล์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [9]

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.4)$$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดี ควรมีค่าฟิลล์แฟกเตอร์เข้าใกล้ 1 เพื่อที่จะทำงาน (Operation Point) ใกล้กับจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด



ภาพที่ 2.17 การหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์

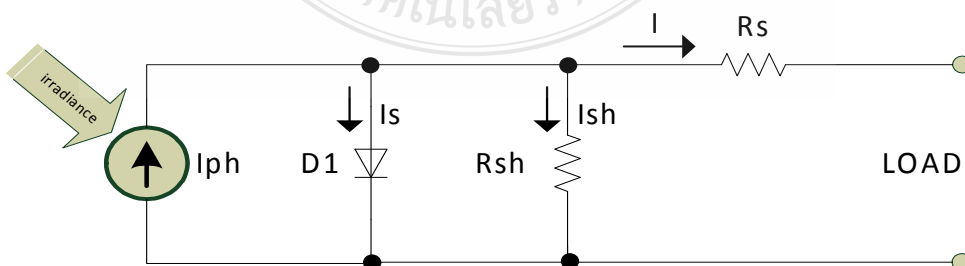
7) ประสิทธิภาพสูงสุด ( $\eta_m$ ) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้[9]

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \tag{2.5}$$

เมื่อ  $P_{in}$  คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์ได้รับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่; ( $W/m^2$ )

### 2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะต้องแทนเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า (Equivalent Circuit) ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติจะประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสแบบคงที่ต่อขนานกับไดโอด และค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมเกิดจากความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นและความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังที่เป็นผลมาจากการต่อกับขั้วต่อภายนอก ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนานส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N Junction ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าต่างๆ เหล่านี้จะมีผลกับค่าของ Fill Factor จะส่งผลให้ค่ากำลังดันออกสูงสุดลดลง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [9]

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{q(V + IR_s)}{N.K.T} - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

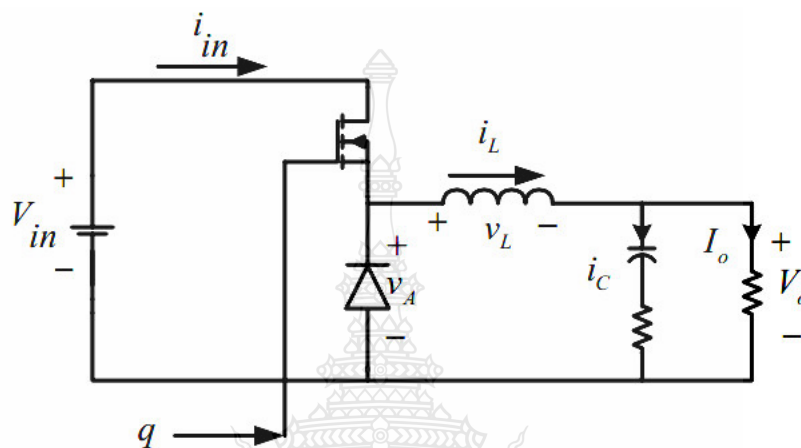
เมื่อ	I	คือ กระแสที่ได้รับจากแสงอาทิตย์; A
	$I_s$	คือ ค่ากระแสรั่วในสภาวะอิ่มตัวขณะจ่ายไบอัสกลับของไดโอด; A
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ ev
	N	คือ ค่า Ideality Factor of the Diode
	K	คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ ; J/Kelvin
	T	คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์; Kelvin
	V	คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด; V
	$R_s$	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์; $\Omega$
	$R_{sh}$	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์; $\Omega$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ โมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่คือ 12V ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ 2.6 หากไม่คิดผลของ  $R_s$  และ  $R_{sh}$  จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ 2.7

$$I = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_s \left[ \exp \frac{q.V}{N.K.T.n_s} - 1 \right] \quad (2.7)$$

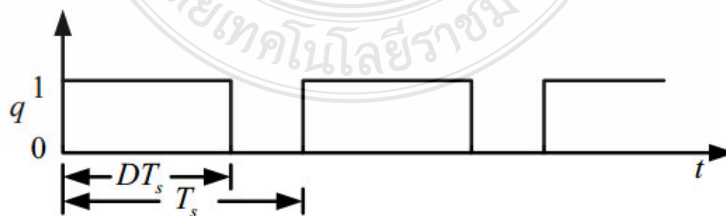
เมื่อ  $n_p$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน  
 $n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

## 2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน [10]



ภาพที่ 2.19 วงจรทอนระดับแรงดัน

วงจรทอนระดับแรงดันไฟตรง หรือวงจร Buck Converter เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าต่ำกว่าแรงดันขาเข้า และเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกมีการกระเพื่อมจากสัญญาณควบคุม จึงนิยมต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) แบบวงจร LC ทางด้านขาออก เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนและเพื่อให้แรงดันขาออกมีความเป็นไฟตรงมากๆ ลักษณะวงจรทอนระดับแรงดันเป็นดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.20 การทำงานของสวิตช์ (q)

โดยการวิเคราะห์สามารถแบ่งการวิเคราะห์ที่ได้ 2 สถานะคือดังรูปที่ 2.20 คือ สถานะแรกในขณะที่สวิตช์นำกระแส ( $q=ON$ ) และในสถานะที่ 2 สวิตช์หยุดนำกระแส ( $q = OFF$ ) โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์การทำงานในสถานะคงตัวกำหนดให้

1) รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลาจะเหมือนกัน ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.8)$$

2) ค่าแรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้ผลรวมค่าผลคูณของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-Second) เป็นศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L(t) dt = 0 \quad (2.9)$$

3) ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์

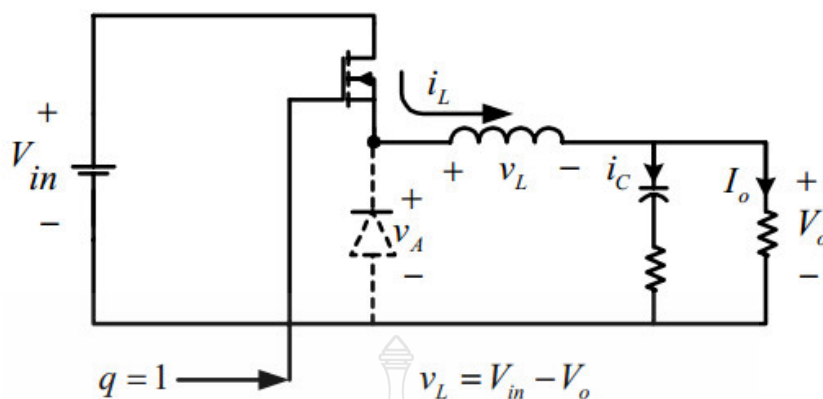
$$i_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(t) dt = 0 \quad (2.10)$$

4) กำลังไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาออก (พิจารณาวงจรทำงานเป็นแบบอุดมคติ)

$$P_{in} = P_o \quad (2.11)$$

### 2.7.1 สถานะสวิตช์นำกระแส

ขณะสวิตช์นำกระแสดังภาพที่ 2.21 ไดโอดจะได้รับการไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) กระแสจึงไหลผ่านจากแหล่งจ่ายไปยังตัวเหนี่ยวนำได้โดยตรง โดยที่กระแสส่วนหนึ่งแยกไหลผ่านตัวเก็บประจุและอีกส่วนหนึ่งไหลผ่านโหลด จากกฎของเคอร์ชอฟที่จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



ภาพที่ 2.21 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์  $q$  นำกระแส

$$-V_{in} + V_L + V_o = 0 \quad (2.12)$$

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.13)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.14)$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส  $dt = DT$  เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าคงที่อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.15)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{(V_{in} - V_o)DT}{L} \quad (2.16)$$

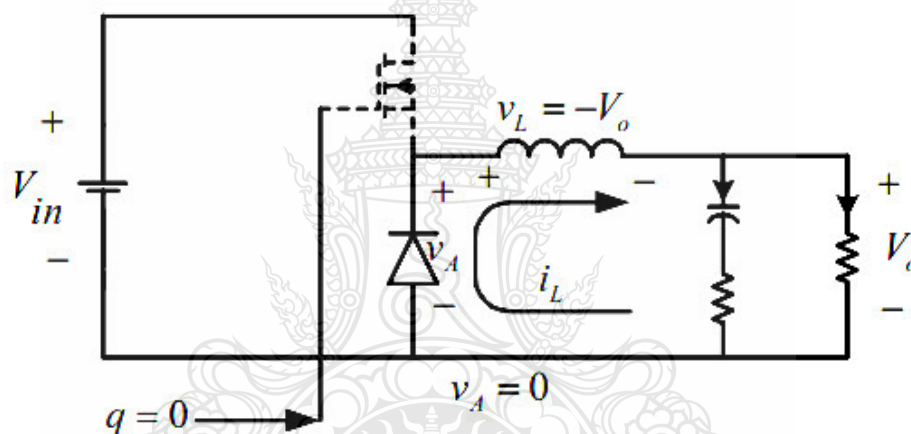
$\Delta i_{L,on}$  หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

### 2.7.2 สภาวะสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสดังภาพที่ 2.22 ไคโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward Bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.17)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.18)$$



ภาพที่ 2.22 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์  $q$  ไม่นำกระแส

ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส แรงดันเข้าวงจรเป็นศูนย์  $dt = (1-D)T$  ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.19)$$

$$\Delta i_{L,off} = \left( \frac{-V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.20)$$



ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ 2.16 และ 2.20 จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.21)$$

$$\left( \frac{V_{in} - V_o}{L} \right) DT + \left[ - \left( \frac{V_o}{L} \right) (1 - D) T \right] = 0 \quad (2.22)$$

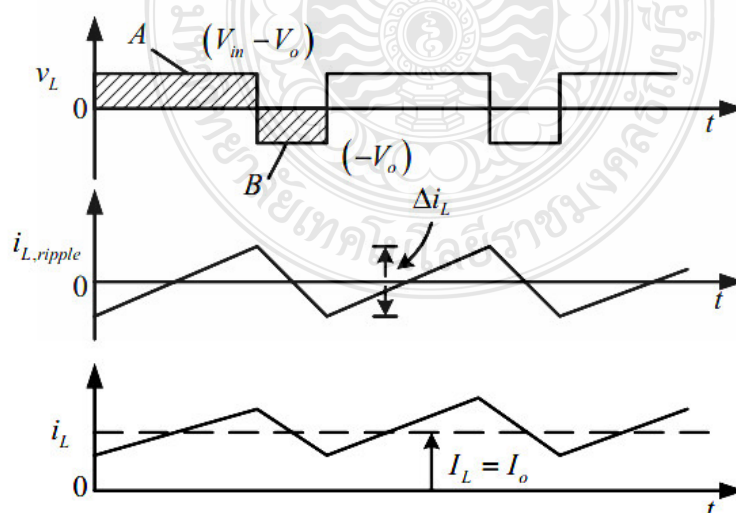
$$V_{in} D - V_o D - V_o + V_o D = 0$$

ดังนั้นจะได้อัตราขยายแรงดัน

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.23)$$

### 2.7.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่จะทำให้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้



ภาพที่ 2.23 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ (บน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (ล่าง)

ดังนั้นจะสามารถกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดคือ

$$I_{L, \max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.24)$$

$$I_{L, \max} = I_L + \frac{1}{2} \left( \frac{V_o}{L} (1-D) T \right) \quad (2.25)$$

$$I_{L, \max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2} \left( \frac{(1-D) T}{L} \right) \quad (2.26)$$

$$I_{L, \min} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.27)$$

$$I_{L, \min} = I_L - \frac{1}{2} \left( \frac{V_o}{L} (1-D) T \right) \quad (2.28)$$

$$\text{เมื่อ } I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.29)$$

ดังนั้น

$$I_{L, \min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left( \frac{(1-D) T}{L} \right) \quad (2.30)$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรทอนระดับแรงดันทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังในสมการที่ 2.30

$$I_{L, \min} = V_o \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0 \quad (2.31)$$

$$\left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0$$

$$\frac{1}{R} = \frac{(1-D)}{2Lf}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

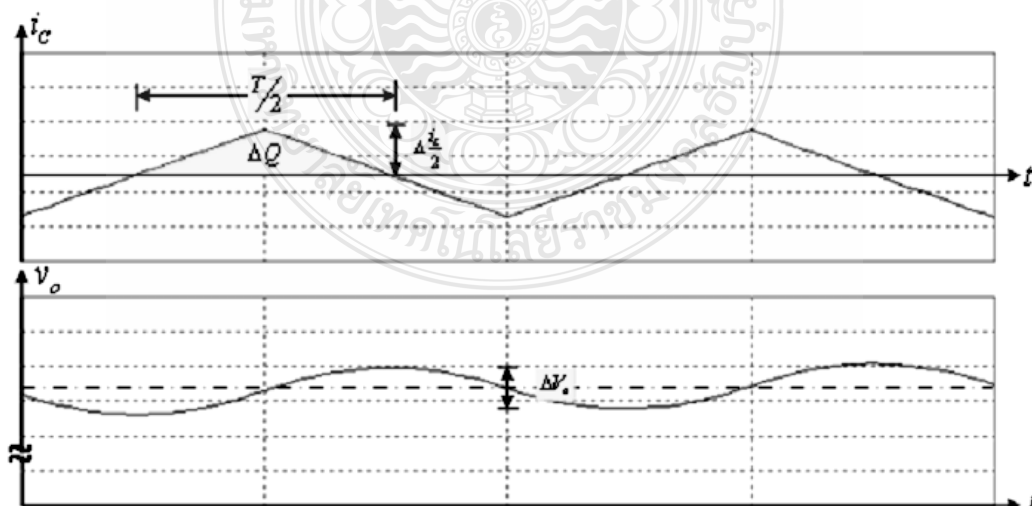
$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.32)$$

และ

$$f = \frac{(1-D)R}{2L_{\min}} \quad (2.33)$$

#### 2.7.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้ เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta Q = C \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.34)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (2.35)$$

แทนค่าสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.34 จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.36)$$

แทนค่าสมการที่ 2.20 ลงในสมการที่ 2.36 จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1-D) T \quad (2.37)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T^2}{8C} \left( \frac{1}{L} \right) (1-D) \quad (2.38)$$

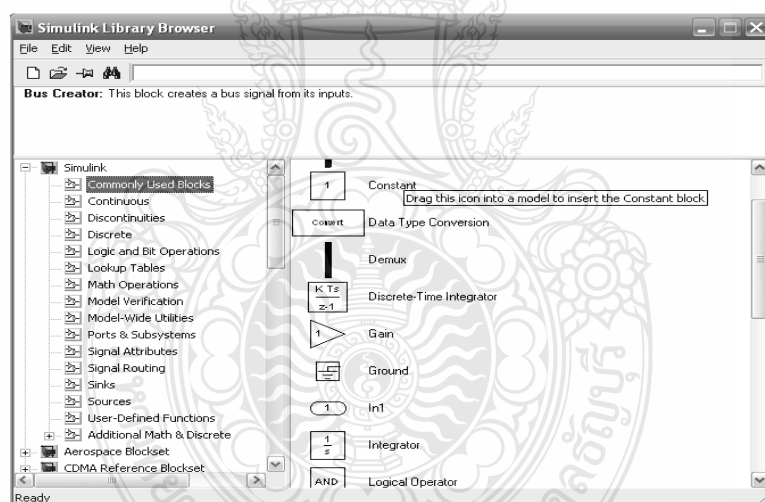
ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.39)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราการลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้หนึ่ง หรือการเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ หรือเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตซ์ให้สูงขึ้น

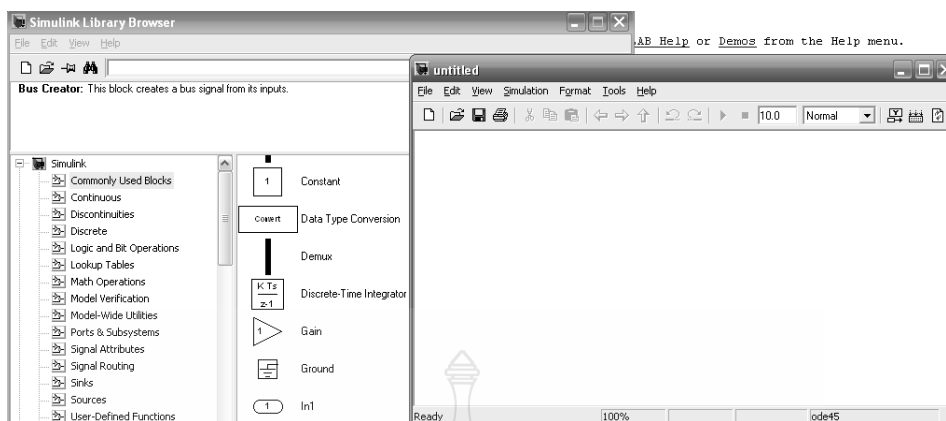
## 2.8 โปรแกรม MATLAB/Simulink

โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมในส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การใช้งานฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง ,การคำนวณในเชิงตัวแปรเพื่อแก้สมการ การใช้งานร่วมกับฮาร์ดแวร์รูปแบบต่างๆ เป็นต้น ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปแบบของ Block Diagram เป็นหลักทำให้มีความง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยใช้ Building Blocks ที่มีมาให้จาก Simulink Library Browser ดังภาพที่ 2.25

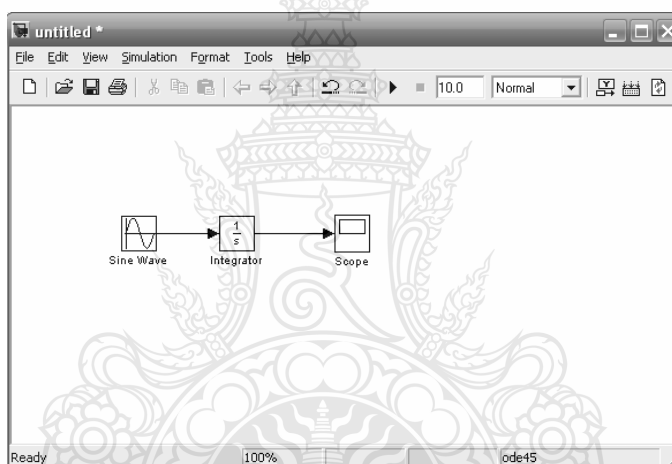


ภาพที่ 2.25 Block Diagram พื้นฐานใน Simulink Library Browser

ในโปรแกรม Simulink นั้น การจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ และส่งผ่านสัญญาณ ข้อมูลจาก Block หนึ่งจะถูกส่งผ่านไปอีก Block หนึ่งโดยจะผ่านเส้นเชื่อมต่อกัน โดยที่สามารถดูผลลัพธ์ของข้อมูลได้หลายลักษณะทั้ง Oscilloscope หรือ Display โดยสามารถเลือกจากในส่วนของ Sink ดังภาพที่ 2.26 และ 2.27



ภาพที่ 2.26 หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink

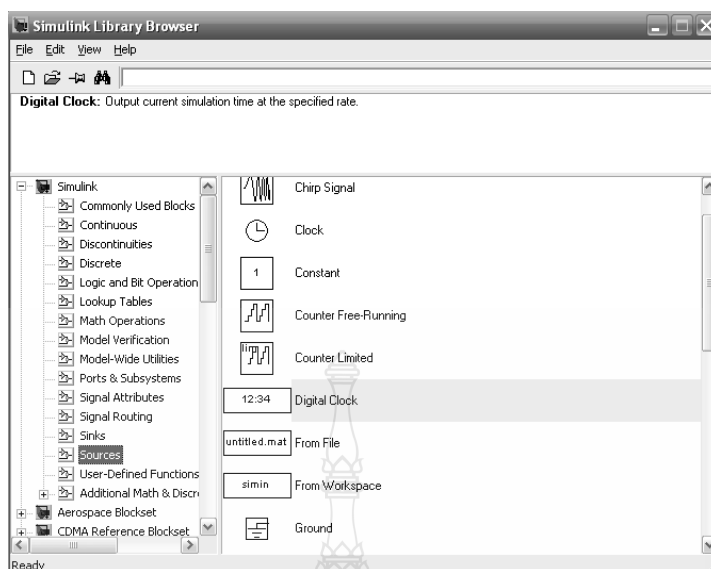


ภาพที่ 2.27 การเชื่อมต่อระหว่าง Block ของ Simulink

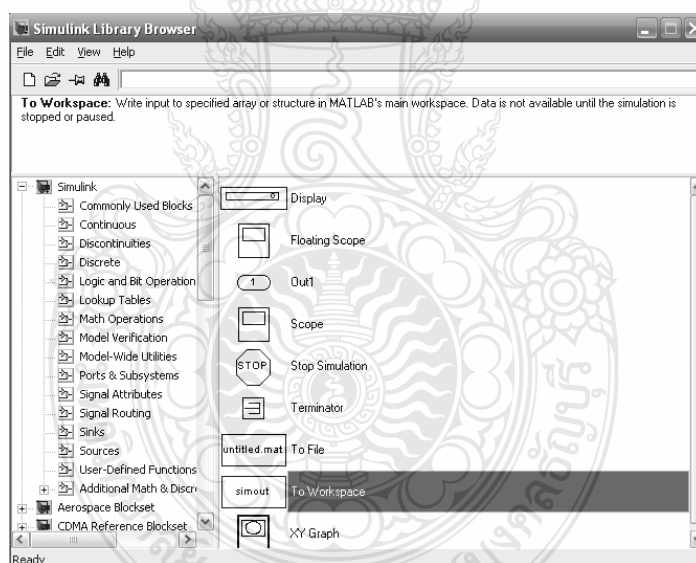
### 2.8.1 กลุ่มของ Block พื้นฐานใน Simulink

#### 1) แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source) และแหล่งแสดงสัญญาณ (Sinks)

กลุ่มของ Source ที่กำหนดมาให้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant), แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator) แหล่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักใช้เพื่อจับเวลาการจำลองปัญหา เป็นต้น ดังภาพที่ 2.28 กลุ่มของ Sinks เป็นกลุ่มที่จะใช้สำหรับเก็บข้อมูล (To Workspace) และแสดงผลของการแก้ปัญหา (Scope, Display) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.29



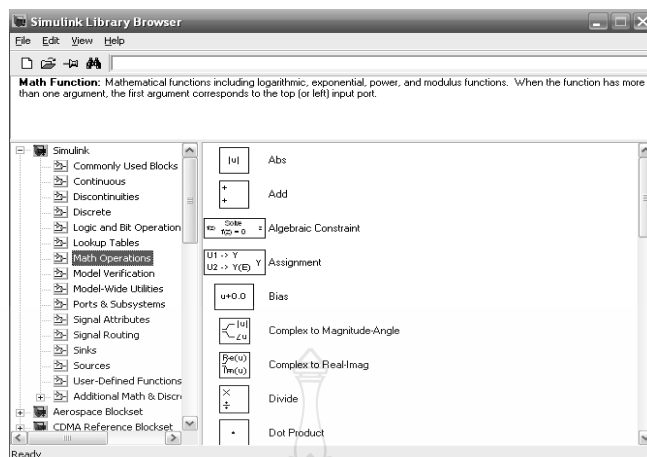
ภาพที่ 2.28 กลุ่ม Block ของ Source



ภาพที่ 2.29 กลุ่ม Block ของ Sinks

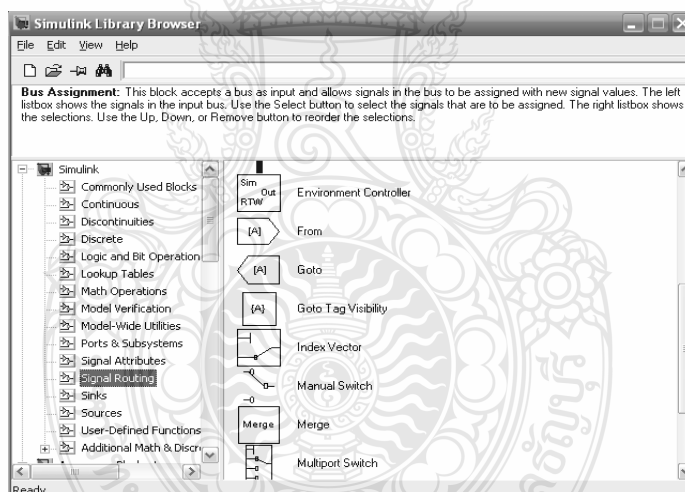
## 2) การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

กลุ่ม Math Operations มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น การบวก (Add) ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Math Function) และการคูณตัวแปร (Gain) เป็นต้น



ภาพที่ 2.30 กลุ่ม Block ของ Math Operations

### 3) ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)



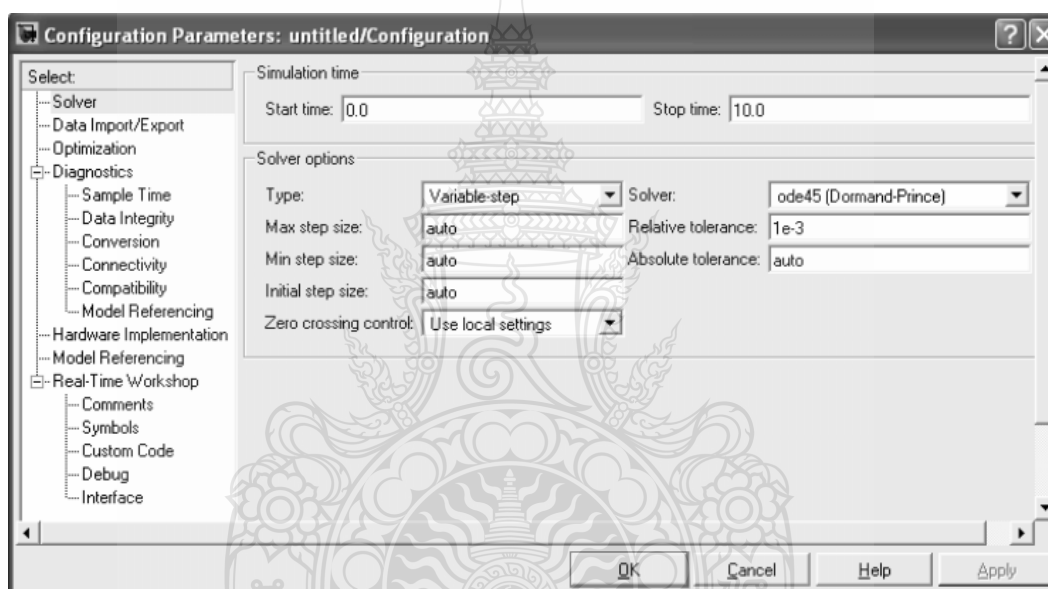
ภาพที่ 2.31 กลุ่ม Block ของ Signal Routing

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นต้องมีการรับส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจไม่สะดวกในการทำงาน ซึ่ง Block ในกลุ่มนี้เป็นประเภท GOTO, FROM, Multiplexing จะทำให้แผนภูมิมีความเป็นระเบียบมากขึ้นดังภาพที่ 2.31



## 2.8.2 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหาในคอมพิวเตอร์นั้น มีข้อสังเกตที่ต้องพึงระวัง คือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหากับระยะเวลาในการจำลองปัญหา เช่นคอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจเพียง 1 วินาที ทำให้ระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจไม่ตรงกันในการจำลองปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ Step Size มีค่าไม่คงที่ (Variable Step Size) ค่า Step Size ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ Step Size มีค่าคงที่ (Fixed Step Size) เป็นวิธีที่มีจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลาหรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ ดังภาพที่ 2.32

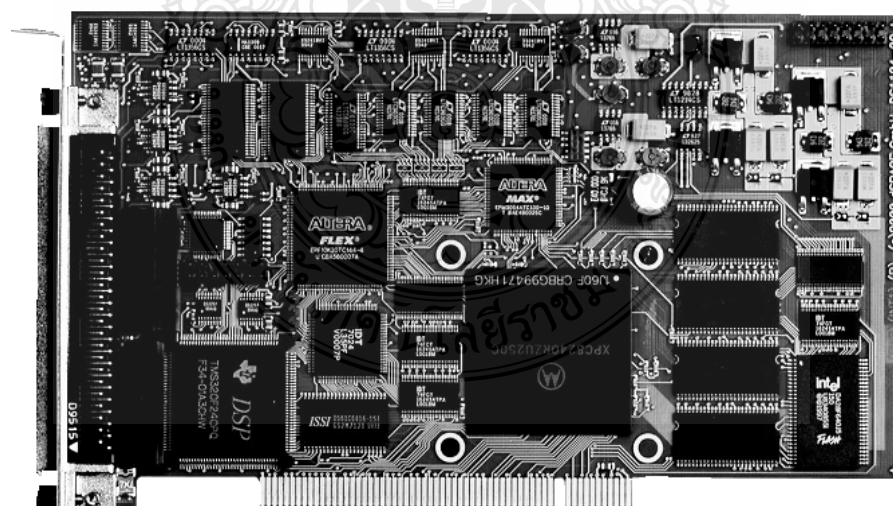


ภาพที่ 2.32 หน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา

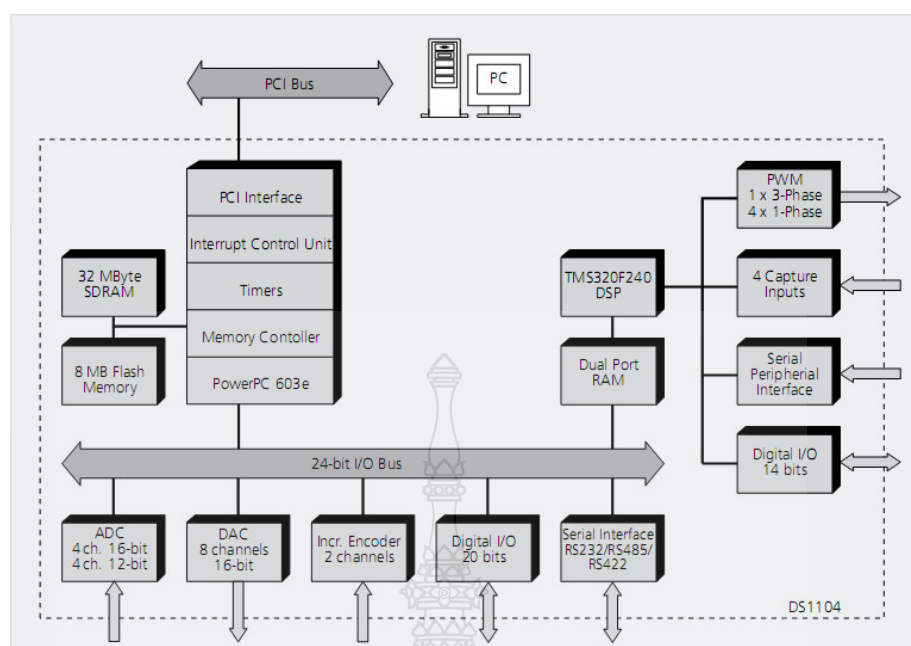
## 2.9 การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE DS1104 [11]

การ์ดอินเทอร์เฟซทำหน้าที่เชื่อมต่อแบบจำลองการทำงานระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับกระบวนการจริง โดยผ่าน Block sets และสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ออกแบบด้วยเวลาจริง การ์ดอินเทอร์เฟซประกอบด้วยจำนวนช่อง A/D, D/A, PWM, Digital I/O และ Encoder ซึ่งใช้สำหรับระบบควบคุม เช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเวกเตอร์ การควบคุมแขนกลและการควบคุมกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ซับซ้อน เป็นต้น คุณลักษณะของการ์ดอินเทอร์เฟซ DS1104 มีดังต่อไปนี้

1. เป็นการ์ดอินเตอร์เฟสสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง (Real-Time) ผ่านสล็อต PCI 32 บิต ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ใช้โปรเซสเซอร์หลัก PPC603e 250 MHz และตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล
  2. (Slave Digital Signal Processor) เบอร์ TMS320F240
  3. ช่องสัญญาณ A/D จำนวน 8 ช่อง ความละเอียด 12 และ 16 บิต แรงดันอินพุต  $\pm 10V$
  4. ช่องสัญญาณ D/A จำนวน 8 ช่อง ความละเอียด 16 บิต แรงดันอินพุต  $\pm 10V$
  5. สัญญาณ PWM จำนวน 10 ช่อง แบบอิสระจาก DSP TMS320F240
  6. ดิจิตอล I/O จำนวน 20 ช่อง แบบขนาน
  7. ช่องสัญญาณสำหรับเอนโค้ดเดอร์จำนวน 2 ช่อง
  8. ช่องสัญญาณอินเตอร์เฟสแบบอนุกรม RS232, RS485
  9. อินเทอร์พาร์ตฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์
  10. แผงเชื่อมต่อสัญญาณ (Panel) สำหรับควบคุมกระบวนการ
  11. Microtec C Compiler
  12. ซอฟต์แวร์จัดการระบบฮาร์ดแวร์ (Experiment and Platform Manager for Hardware Management)
  13. ไดรเวอร์ซอฟต์แวร์สำหรับ MATLAB/Simulink และ Control Desk Standard



ภาพที่ 2.33 การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE รุ่น DS1104

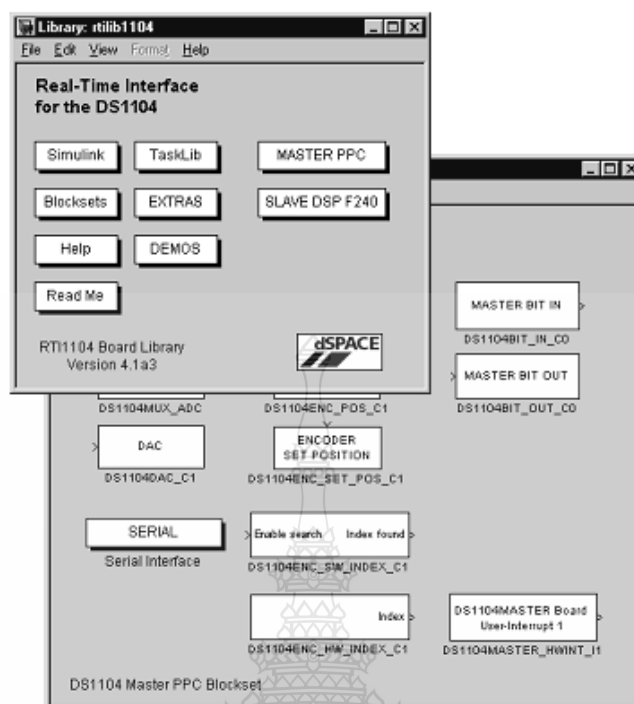


ภาพที่ 2.34 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเทอร์เฟซ DS1104

ซอฟต์แวร์สำหรับการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE ประกอบด้วย

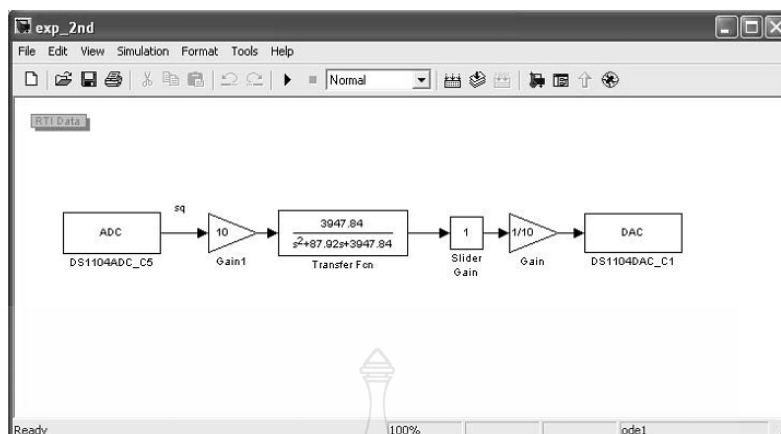
1) Real-Time Library (RTLib 1104) เป็น Blocksets ที่ถูกติดตั้งบน Simulink สำหรับการใช้งานเชื่อมโยง A/D, D/A PWM Blockset กับ โปรแกรม MATLAB/Simulink คอมไพล์โปรแกรมและจำลองการทำงานแบบเวลาจริง ดังภาพที่ 2.35 และ 2.36

2) Control Desk ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แบบ Graphic User Interface (GUI) โดยทำหน้าที่โหลดข้อมูล สั่งเริ่ม หรือหยุดทำงาน ปรับและแสดงค่าของตัวแปรต่างๆ ใน Simulink แบบเวลาจริงดังภาพที่ 2.37

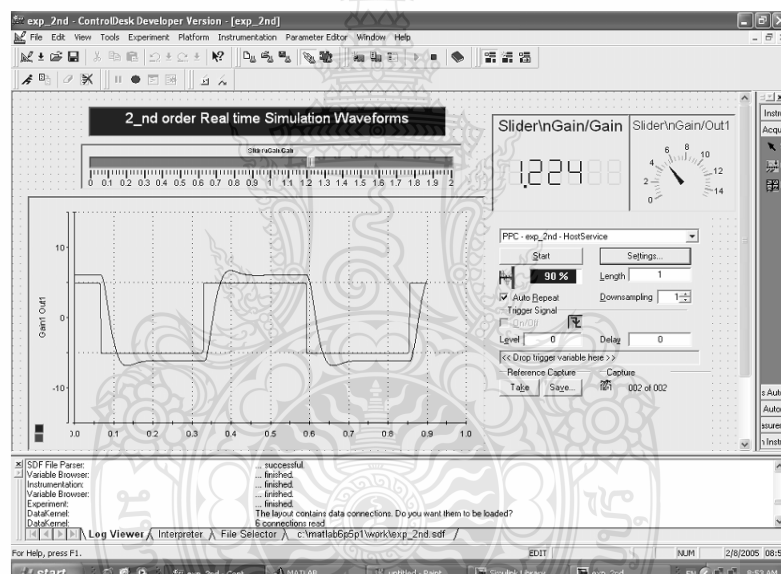


ภาพที่ 2.35 บล็อก RTLib 1104

การใช้ Real-Time Library ซึ่งเป็น Blocksets ที่ใช้หลักการของ Digital to Analog Converter เพื่อทำให้เป็นสัญญาณจริงในรูปแบบทันทเวลา ภาพที่ 2.37 เป็นการใช้โปรแกรม Control Desk เพื่อควบคุมสัญญาณในรูปแบบทันทเวลา โดยสามารถปรับค่าตัวแปรต่างๆที่สร้างขึ้นด้วย Simulink ซึ่งสามารถดูผลตอบสนองของระบบที่สร้างขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรข้างต้นได้ จึงมีความสะดวกเนื่องจากคอมไพล์ DSP Code เพียงครั้งเดียวจะได้ไฟล์ตัวแปรซึ่งสามารถนำไปใช้กับ Control Desk เพื่อการควบคุมแบบทันทเวลาได้เลย หากไม่ใช้ Control Desk เมื่อมีการแก้ไขค่าพารามิเตอร์ต่างๆใน Simulink จะต้องคอมไพล์ใหม่ทุกครั้งทำให้เสียเวลาในการทดสอบ



ภาพที่ 2.36 การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับ D/A ของ DS1104



ภาพที่ 2.37 การจำลองแบบสัญญาณจริงโดยใช้ Control Desk

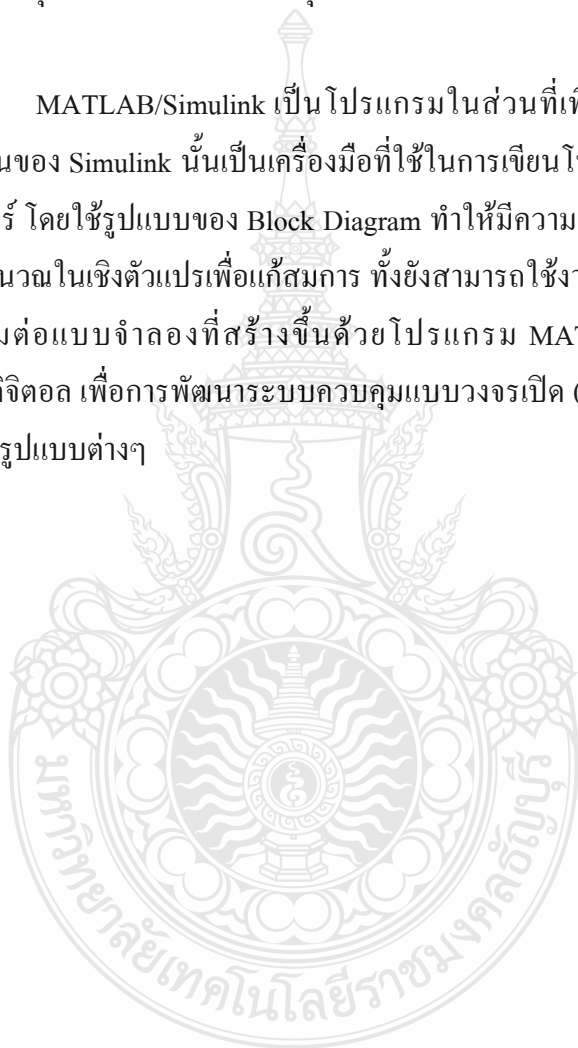
## 2.10 สรุปสาระสำคัญท้ายบท

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนจากพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยคุณสมบัติสำคัญที่เรียกว่า “ผลของโฟโตโวลตาอิก” เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้งานมีอยู่ 3 ชนิดคือ ซิลิคอนผลึกเดี่ยว ซิลิคอนผลึกรวม และซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส โดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ 5 ตัวแปร คือ

ความเข้มแสง อุณหภูมิขณะทำงาน ผลของไดโอด ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ และความต้านทานขนานภายในเซลล์

วงจรทอนระดับแรงดันไฟตรง เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าต่ำกว่าแรงดันขาเข้าโดยการควบคุมช่วงเวลานำกระแสและหยุดนำกระแสของความถี่สวิตซ์ซึ่งที่อุปกรณ์สวิตซ์กำลัง การออกแบบวงจรทอนระดับแรงดันจำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดที่เหมาะสม ดังนั้นการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจึงควรใช้ขนาดที่เล็กที่สุดที่ยังคงทำให้กระแสที่ไหลผ่านโหลดอยู่ในโหมดกระแสแบบต่อเนื่อง

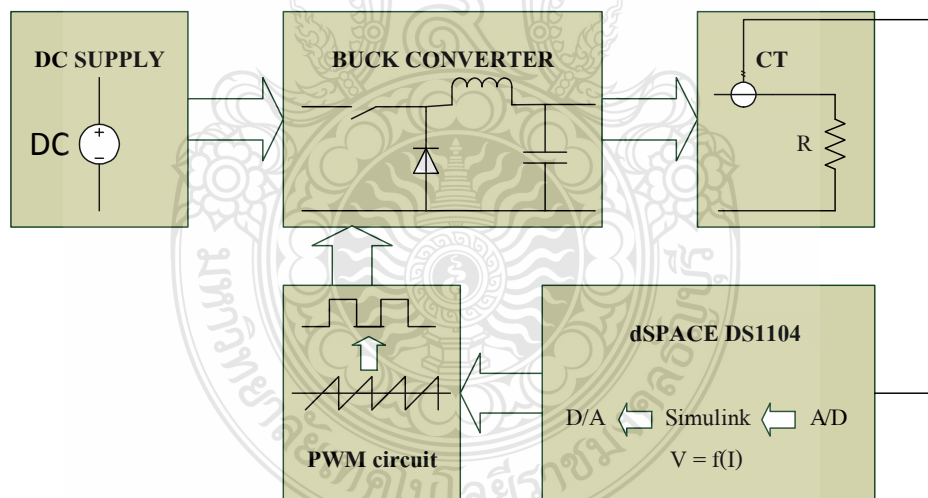
โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมในส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB โดยในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปแบบของ Block Diagram ทำให้มีความง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้นมีประโยชน์ เช่น การคำนวณในเชิงตัวแปรเพื่อแก้สมการ ทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับฮาร์ดแวร์รูปแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมต่อแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เพื่อการพัฒนาระบบควบคุมแบบวงจเปิด (Open Loop) และวงจรปิด (Closed Loop) ในงานรูปแบบต่างๆ



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง โดยใช้หลักการควบคุมแรงดันขาออกให้สอดคล้องกับกระแสขาออก โดยการตรวจจับกระแสขาออกแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยคาร์ดิโนเตอร์เฟสเพื่อส่งไปคำนวณหาค่าแรงดันควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยสัญญาณควบคุมจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกไปสู่วงจรสร้างสัญญาณแบบ PWM ได้ค่าควิตี้ไซเคิลเพื่อนำไปขับเคลื่อนการทำงานของ IGBT ในวงจรทอนระดับแรงดันให้ได้ค่าคุณลักษณะของกระแส แรงดันเป็นไปตามการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบในส่วนของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ โดยโครงสร้างงานวิจัยชิ้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และอีกส่วนคือวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการทำงานเชื่อมต่อกับคาร์ดิโนเตอร์เฟส เพื่อนำไปสู่การสร้างสัญญาณจริงที่เหมาะสมในการทดสอบการจ่ายโหลด ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทั้งหมดดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างส่วนประกอบของงานวิจัย

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานทั้งในส่วนของการซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาเกี่ยวกับสมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานและการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน การใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink และการใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟส

ขั้นตอนที่ 2: ออกแบบและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้สมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้า จากนั้นใช้แบบจำลองดังกล่าวพัฒนาเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

ขั้นตอนที่ 3: เปรียบเทียบผลการจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต โดยเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

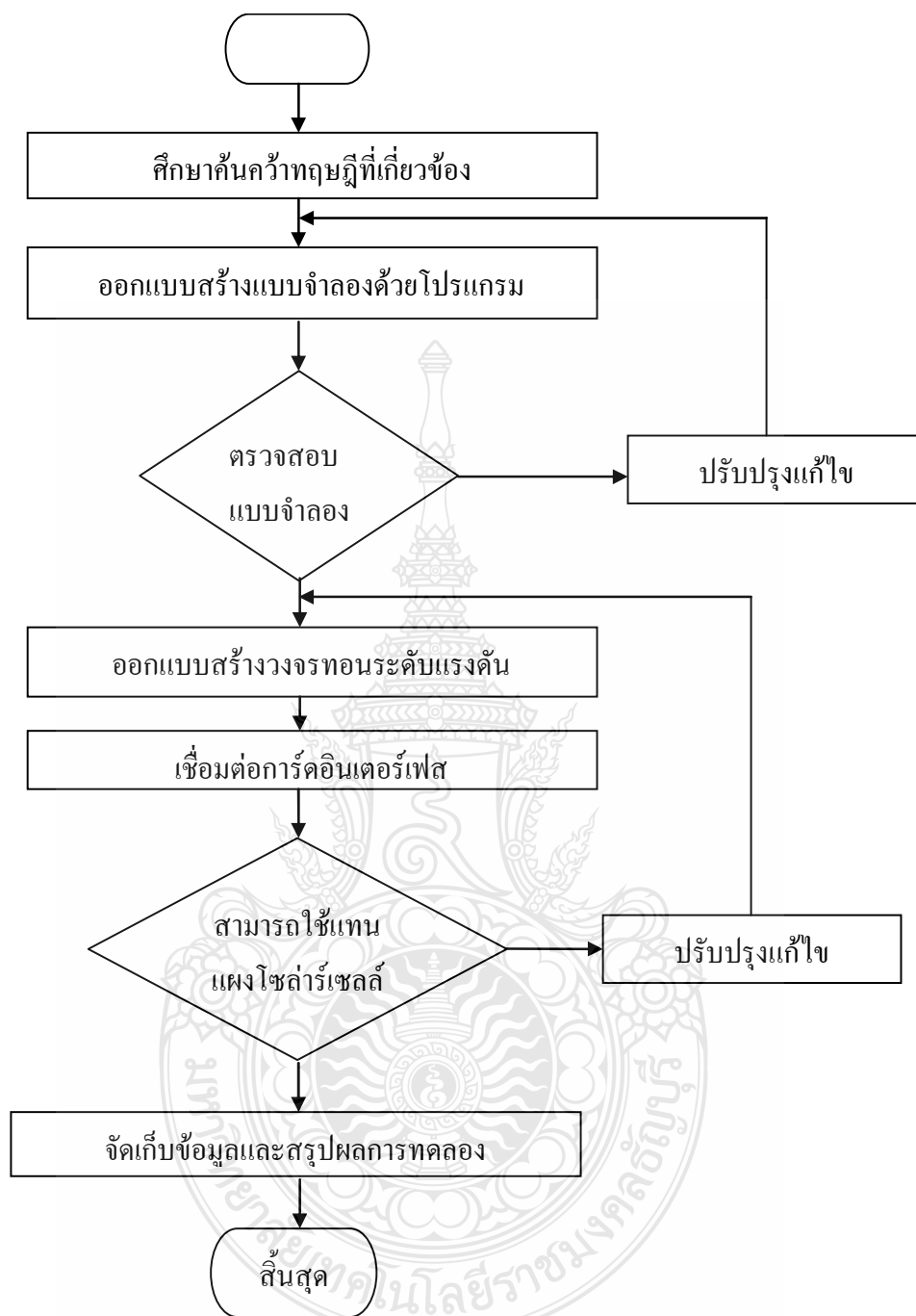
ขั้นตอนที่ 4: ออกแบบและสร้างวงจรทอนระดับแรงดัน โดยการนำกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองมาเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับแรงดัน

ขั้นตอนที่ 5: เชื่อมต่อการ์ดอินเตอร์เฟสเข้ากับวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM ซึ่งจะไปควบคุมค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของวงจรทอนระดับแรงดัน เพื่อการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกโดยใช้การปรับค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของไอจีบีที เพื่อให้การจ่ายกำลังของวงจรทอนระดับเป็นไปตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 6: เปรียบเทียบค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับเมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิแตกต่างกันกับแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนที่ 7: วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

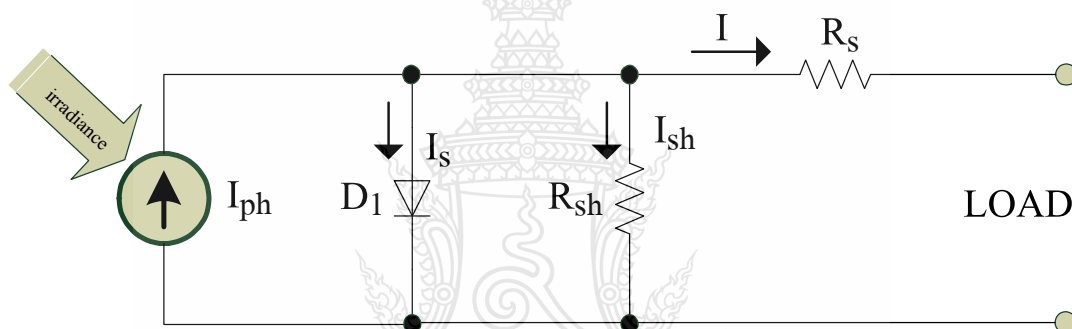




ภาพที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

การออกแบบและการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Cell) นั้นสร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB R2007a เนื่องจากโปรแกรมนี้มีความสามารถในการตอบสนองความต้องการทางด้านการจำลองระบบได้ดี สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น M - File, Simulink และ GUI เป็นต้น อีกทั้งโปรแกรม MATLAB/Simulink ยังสามารถเชื่อมต่อกับการ์ดอินเตอร์เฟซเพื่อการควบคุมระบบให้เป็นสัญญาณจริง (Real - Time) ได้อีกด้วย โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ Block ต่างๆ ในส่วนของ Simulink ในการสร้างแบบจำลองซึ่งแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกสร้างให้เป็นดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการจำลองได้ใช้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX60 ซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด 60W โดยใช้ค่า Open Circuit Voltage ( $V_{OC}$ ) เป็น 21.1V, Short Circuit Current ( $I_{SC}$ ) เป็น 3.8A , Temperature Coefficient of Short Circuit Current ( $K_p$ ) เป็น 3 mA/°C, Temperature Coefficient of Open Circuit Voltage ( $K_v$ ) เป็น -73mV/°C ดังตารางที่ 3.1 ส่วนค่าตัวแปรของไดโอด (Ideality Factor of the Diode and Reverse Saturation Current of Diode) ,ค่าความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ (Solar Irradiance) ค่าความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) ค่าความต้านทานขนาน (Shunt Resistance) และอุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) นั้นจะกำหนดให้เป็นตัวแปรหลักในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อค่าตัวแปรต่างๆข้างต้นมีการเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ Solarex รุ่น MSX-60 [3]

Solarex MSX60 Specifications (1kW/m <sup>2</sup> ,25°C)	
Characteristics	SPEC
Typical peak power (P <sub>m</sub> )	60 W
Voltage at peak power (V <sub>mp</sub> )	17.1 V
Current at peak power (I <sub>mp</sub> )	3.5 A
Short-circuit current (I <sub>sc</sub> )	3.8 A
Open-circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	21.1 V
Temperature coefficient of open-circuit voltage ( $\beta$ )	-73mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current ( $\alpha$ )	3mA/°C
Approximate effect of temperature on power	0.38W/°C

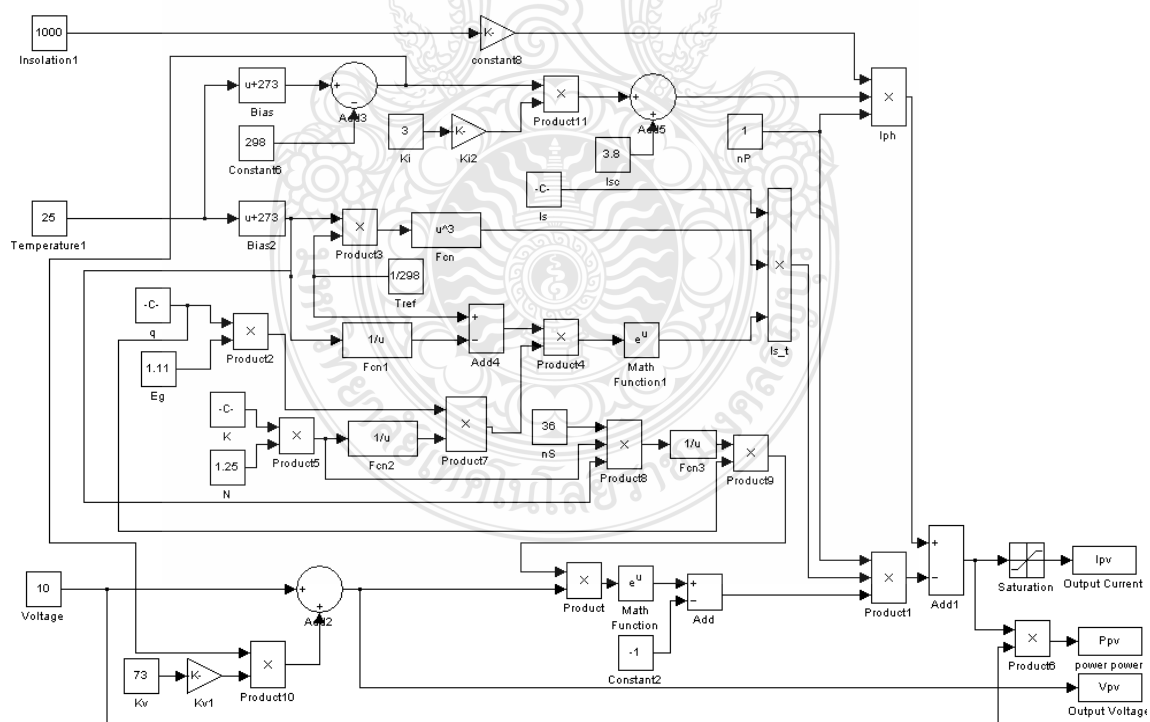
ในการออกแบบสร้างแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ จากสมการที่ 2.1, 2.3 และ 2.6 ในบทที่ 2 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมี 5 ตัวแปรหลักคือ กระแสที่สร้างขึ้นจากแสง ( $I_{ph}$ ) ผลของไดโอดได้แก่ค่า Ideality Factor of the Diode มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับการผลิตโครงสร้างของเซลล์และค่ากระแสไบอัสอิมิต์ย้อนกลับของไดโอด ตามลำดับ ( $N \& I_s$ ) ค่าความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นรวมกับความต้านทานของซิลิคอนด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก ( $R_s$ ) และการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ P - N Junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ ( $R_{sh}$ ) สำหรับโปรแกรม MATLAB ในส่วน Simulink ที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการข้างต้นเพื่อศึกษาผลกระทบของทั้ง 5 ตัวแปรนั้นได้ประกอบขึ้นจาก Block ชนิดเครื่องมือวัดและการแสดงผล Block ในส่วนของการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ทำงานเชื่อมโยงกันรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 Block ดำเนินการต่างๆ ใน Simulink

สัญลักษณ์	รายละเอียด
 Display	การแสดงผลข้อมูลเป็นตัวเลข
 Scope	การแสดงผลสัญญาณบนออสซิลโลสโคป
 Constant	ค่าคงที่
 Gain	การคูณอินพุตด้วยค่าที่กำหนด
 Product	การรับอินพุตเข้ามา 2 ค่ามาคูณกันผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุต
 Sum	การบวกหรือลบอินพุตที่เข้ามา ผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุต
 Add	การรับอินพุตเข้ามา 2 ค่ามาบวกกันผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุต
 Math Function	การรับอินพุตเข้ามาเป็น u ของฟังก์ชันเอกโปเนนเชียล
 Bias	การรับอินพุตเข้ามาแล้วบวกด้วยค่าที่กำหนด
 Fcn	การกำหนดสมการทางคณิตศาสตร์



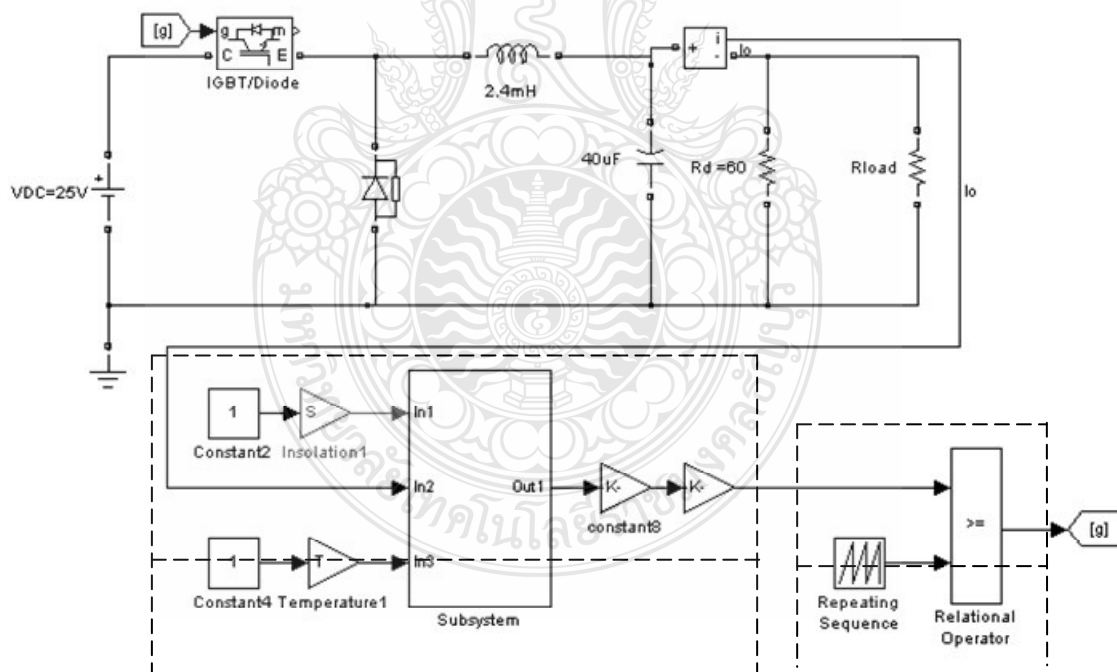
มีผลให้สามารถตัดผลของความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) ออกไปได้ เพื่อให้การสร้างแบบจำลองมีความสะดวกและง่ายมากขึ้นตามสมการที่ 2.7 ซึ่งแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังในภาพที่ 3.5 นั้นจะให้ผลของกราฟกระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออก (I - V Curve) และกราฟกำลัง-แรงดันไฟฟ้าขาออก (P - V Curve) ตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในลำดับขั้นต่อไปนำค่าที่ได้จากแบบจำลองซึ่งได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_m$ ) แรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mp}$ ) กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mp}$ ) ที่ STC (ความเข้มแสง  $1000\text{W/m}^2$  อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$ ) ไปเปรียบเทียบกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX - 60 ในตารางที่ 3.1 เพื่อตรวจสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนและแก้ไขความถูกต้องของแบบจำลองให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในภาพที่ 3.5 จึงสามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในเรื่องผลกระทบของระดับของแสงอาทิตย์ ผลกระทบของอุณหภูมิที่แผงเซลล์ผลกระทบของตัวแปรไดโอดได้เป็นอย่างดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมในการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง (Real - Time) ในหัวข้อถัดไปอีกด้วย



ภาพที่ 3.5 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.4 การออกแบบวงจรกำลังโดยใช้วงจรถอนระดับแรงดัน

การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช่วงจรถอนระดับแรงดันทำงานร่วมกับอาร์คิเตอร์เฟส โดยมีหลักการทำงานคือใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transducer; CT) ตรวจจับกระแสขาออกของวงจรถอนระดับแรงดันแล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าส่งไปยังอาร์คิเตอร์เฟสเพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล สัญญาณดิจิทัลดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ด้วยแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่แล้ว ค่าดิวตี้ไซเคิลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อนำไปขับเกตไอจีบีที (IGBT) ให้วงจรถอนระดับแรงดันจ่ายแรงดันไฟฟ้าสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้สามารถที่จ่ายนำไปจ่ายโหลดได้จริง โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิที่แผงเซลล์ ค่าตัวแปรไดโอดและจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมได้โดยการเปลี่ยนที่แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้หลักการของวงจรถอนระดับแรงดัน

### 3.4.1 การออกแบบวงจรทอนระดับแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของวงจรทอนระดับแรงดันเป็นดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร

Parameter	Value
Input Voltage	25 V
Output Voltage	7V-22V
Switching freq.	10 kHz
Load Resistance	$2\ \Omega$ $49\ \Omega$
Power Output	60 W
Ripple ratio	1%

#### 1) คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ

กำหนดแรงดันขาออกเป็น 7 V ( $V_{in}=25V$ ) ที่แรงดัน 7 V คำนวณค่า ตัวเหนี่ยวนำ (Duty Cycle) ได้เป็น

$$D = \frac{V_o}{V_{in}}$$

$$= \frac{7}{25} = 0.28$$

ที่แรงดัน 22 V คำนวณค่า ตัวเหนี่ยวนำ (Duty Cycle) ได้เป็น

$$D = \frac{V_o}{V_{in}}$$

$$= \frac{22}{25} = 0.88$$

ดังนั้นค่าเปลี่ยนแปลงของตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 0.28 ถึง 0.88



2) คำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ( $L_{\min}$ )

$$\begin{aligned} L_{\min} &= \frac{(1-D)R}{2f} \\ &= \frac{(1-0.28) \times 60}{2 \times 10 \times 10^3} = 2.16 \text{ mH} \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกค่าความเหนี่ยวนำเป็น 2.4mH

3) คำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่นเท่ากับ 1%

$$\begin{aligned} C &= \frac{1-D}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \\ &= \frac{(1-0.28)}{8 \times 2.4 \times 10^{-3} \times (10 \times 10^3)^2 \times 0.01} = 37.5 \mu\text{F} \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกค่าตัวเก็บประจุเป็น 40  $\mu\text{F}$

การออกแบบหาขนาดตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนระดับนั้น ที่ค่าแรงดันขาออกเป็น 7 V นั้น ค่าความต้านทานโหลดจะมีค่าประมาณ 2  $\Omega$  ซึ่งจะกำหนดให้วงจรทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{L, \max} &= \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2} \left( \frac{(1-D)T}{L} \right) \\ &= \frac{7}{2} + \frac{7}{2} \left[ \frac{(1-0.28) \times 10^{-4}}{2.4 \times 10^{-3}} \right] = 3.605 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_{L, \min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left( \frac{(1-D)T}{L} \right)$$

$$= \frac{7}{2} - \frac{7}{2} \left[ \frac{(1-0.28) \times 10^{-4}}{2.4 \times 10^{-3}} \right] = 3.395 \text{ A}$$

จากค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดข้างต้น แสดงว่าวงจรทอนระดับแรงดันนั้นทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง(Continuous Current Conduction Mode) ตามที่กำหนด

#### 4) การเลือกใช้ไอจีบีที

ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรทอนระดับแรงดันกำหนดตามพิกัดกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ 60 W แรงดันไฟฟ้าที่เลือกใช้คือ 25 V และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่า 4 A ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอจีบีที เบอร์ IRG4BC40K แบบ N - Channel ซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ที่ 600 V และรับกระแสไฟฟ้าได้ 25 A และใช้ค่าแรงดันพัลส์ขั้วเบส  $V_{GE} = 15V$

#### 5) การเลือกใช้ไดโอดกำลัง

การเลือกพิกัดกระแสของไดโอดกำลังนั้นกำหนดจากกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวงจรทอนระดับแรงดันเป็น 4 A และค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น 25 V ดังนั้นเพื่อรักษาความปลอดภัยเท่ากับ 2.0 เท่า เพราะฉะนั้นกระแสของไดโอดจะได้เท่ากับ  $4 \times 2.0 = 8 \text{ A}$  จึงเลือกใช้ไดโอดกำลังเบอร์ 10ETF10 Fast Soft Recovery Rectifier Diode สามารถรับกระแสไฟฟ้าได้ 10A

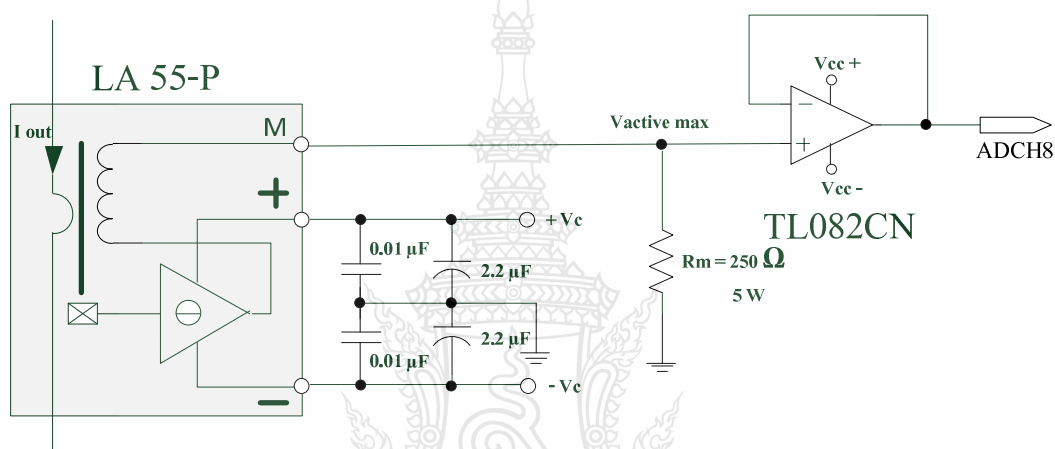
### 3.4.2 การออกแบบวงจรส่วนตรวจจับกระแสขาออก

อุปกรณ์ตรวจจับกระแส (Current Transducer) นั้นทำหน้าที่ตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันจากนั้นเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยต่อตัวต้านทานเข้าไปที่ส่วนขาออก เพื่อส่งไปเข้ายังอุปกรณ์อินเตอร์เฟซการ์ดเพื่อนำไปคำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณพัลส์ขั้วเบสของอุปกรณ์สวิตช์ IGBT ต่อไป ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Current Transducer ของ LEM รุ่น LA 55 - P ซึ่งมี Conversion Ratio 1:1000 แบบใช้ลวดตัวนำล่องผ่าน สามารถตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 50 A จากวงจรที่ออกแบบกระแสที่ไหลมีค่าสูงสุดที่ 4 A จะได้ค่ากระแสเอาต์พุต  $I_{out} = 4 \text{ mA}$  แต่เพื่อให้ได้ความละเอียดในการวัดสูงขึ้นจึงพันลวดตัวนำจำนวน 5 รอบ ซึ่งทำให้ได้กระแสเอาต์พุตเป็น 20mA การเลือกค่าตัวต้านทานเพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าแสดงได้จาก

$$R_m = \frac{V_{\text{active max}}}{I_m \text{ max}}$$

$$= \frac{5}{20 \times 10^{-3}} = 250 \Omega$$

เมื่อ  $V_{\text{active max}}$  คือ แรงดันสูงสุดที่ผ่านการแปลงจากกระแสเซนเซอร์  
 $I_m \text{ max}$  คือ กระแสสูงสุดที่วัดได้จากเซนเซอร์

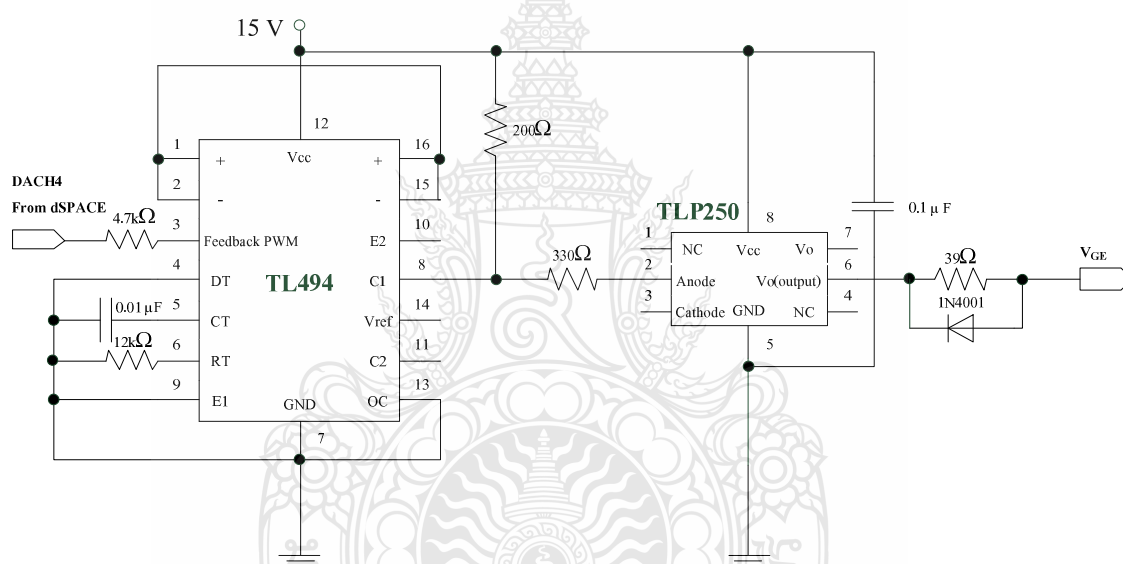


ภาพที่ 3.7 วงจรตรวจจับกระแสและเชื่อมต่อกับอินเทอร์เฟซการ์ด

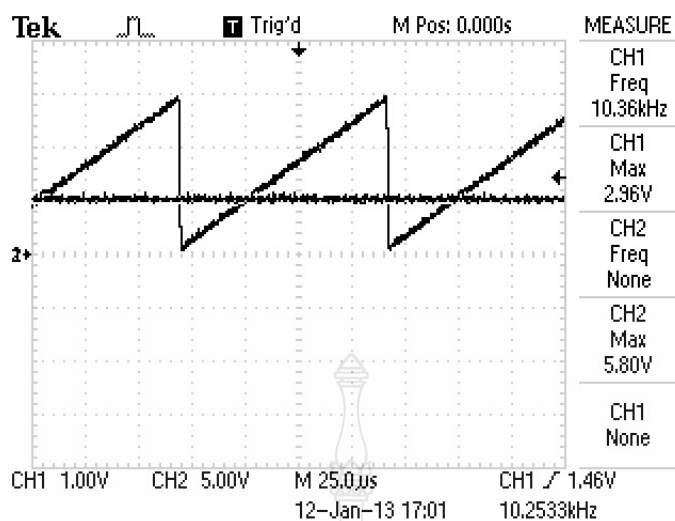
### 3.5 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง

วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมวัฏจักรการทำงานของสวิตช์กำลัง จะใช้ ไอซีเบอร์ TL494 เป็นไอซีที่สามารถสร้างความถี่ในการสวิตช์และสามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ได้ โดยกำหนดความถี่ที่เลือกใช้งานคือ 10 kHz ซึ่งในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมวัฏจักรการทำงานของสวิตช์กำลังจะประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญด้วยกันคือ ส่วนแรกไอซีเบอร์ TL494 จะเป็นวงจที่ใช้กำเนิดสัญญาณพัลส์ได้ที่ความถี่ 10 kHz สัญญาณนี้จะถูกส่งออกไปทางขา 8 โดยการกำหนดความถี่นั้นสามารถกำหนดได้จาก ค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ขา 6 และ 5 ตามลำดับ ในที่นี้เลือกใช้ค่าความต้านทานเป็น 12 k $\Omega$  และค่าตัวเก็บประจุเป็น 0.01  $\mu\text{F}$  ในส่วนที่สองคือ ส่วนการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลโดยใช้หลักการมอดูเลตสัญญาณ โดยนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก DS1104 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้เกิดจากการตรวจจับค่ากระแสขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแล้วแปลงจากสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณ

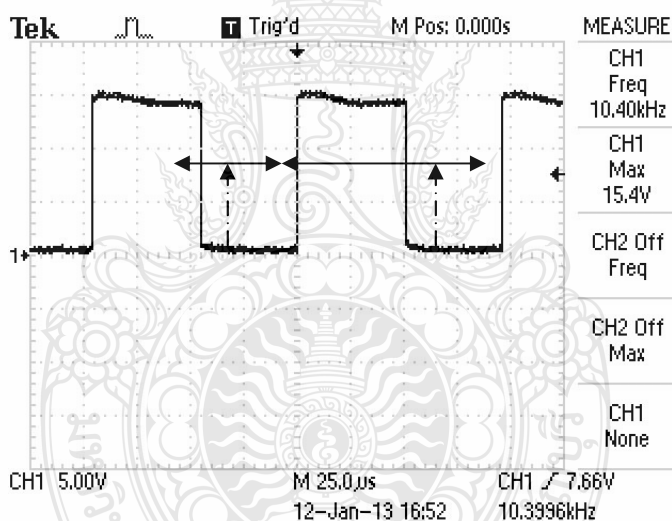
ดิจิตอล (A/D) ส่งเข้าไปคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของโซลาร์เซลล์ ผลที่ได้คือค่าแรงดันไฟฟ้าตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไฟฟ้าขาออก สัญญาณดิจิตอลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A) ส่งผ่านตัวต้านทาน  $4.7\text{ k}\Omega$  มาเข้าขาที่ 3 ของไอซี TL494 เพื่อเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้จากขา 5 ผลของการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองส่งผลให้สามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิลได้นั่นเอง จากนั้นสัญญาณพัลส์จากขา 8 ของไอซี TL494 จะถูกส่งไปเข้าขา 2 ของไอซีเบอร์ TLP250 ก่อนที่จะนำไปขับเกตไอจีบีที เพื่อขยายสัญญาณให้ได้  $15\text{ VDC}$  และเป็นการแยกการเชื่อมต่อระหว่างวงจรกำลังและวงจรควบคุมอีกด้วย เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของวงจรควบคุม สัญญาณพัลส์ขับเกตของไอจีบีทีจะได้จากขา 6 ของไอซีเบอร์ TLP250 วงจรภาคควบคุมของวงจรทอนระดับแรงดัน ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 วงจรภาคควบคุมของวงจรทอนระดับแรงดัน



ภาพที่ 3.9 การมอดูเลตสัญญาณพื่นเหลี่ยมกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

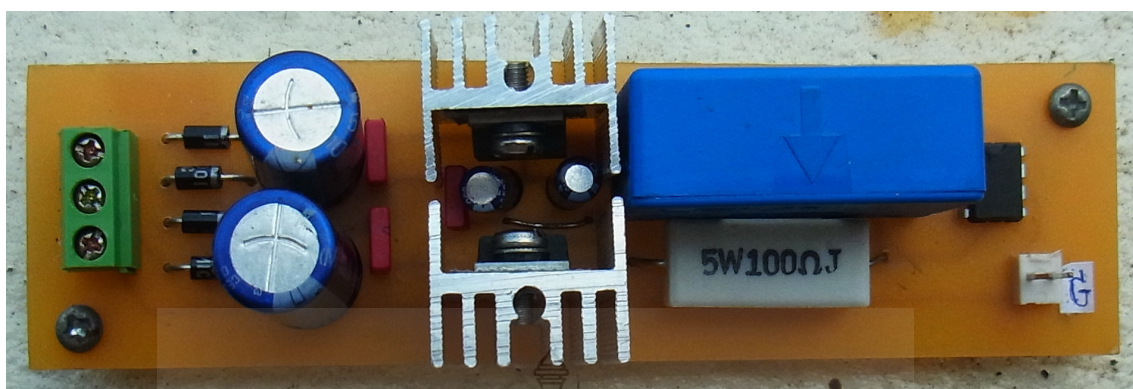


ภาพที่ 3.10 สัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของไอจีบีที ที่ควิตซ์ไซเคิลเป็น 0.53 ความถี่สวิตซ์ 10 kHz

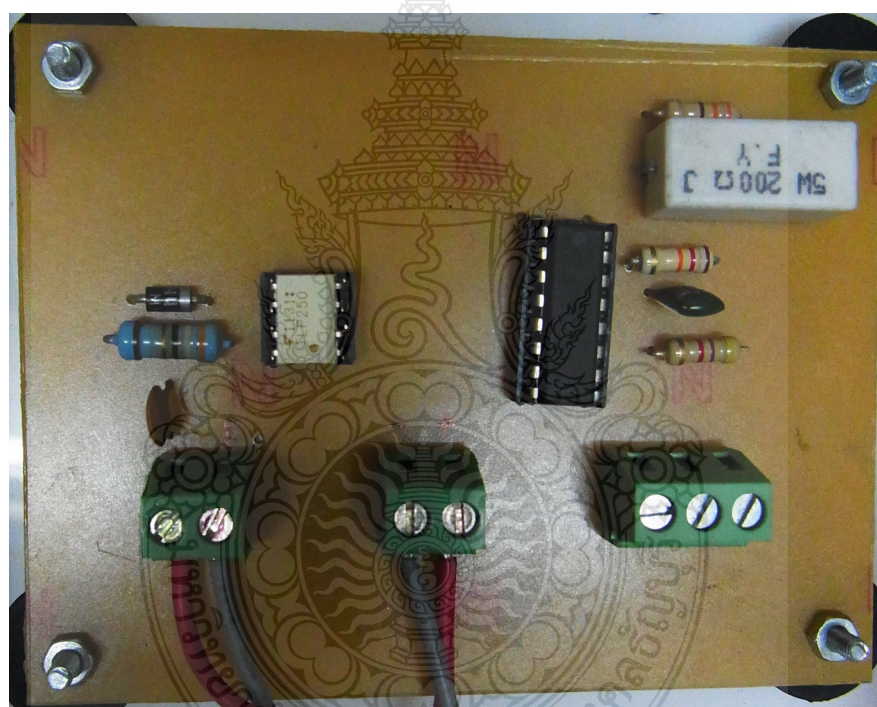
ในภาพที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณพื่นเหลี่ยมและสัญญาณจาก DS1104 ของไอซี TL494 เพื่อกำหนดค่าควิตซ์ไซเคิลของสัญญาณพัลส์ขั้วเกิด และสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดที่ออกจากไอซี TLP250 ขนาดแรงดัน 15 V ที่ความถี่ 10 kHz ดังแสดงในภาพที่ 3.10



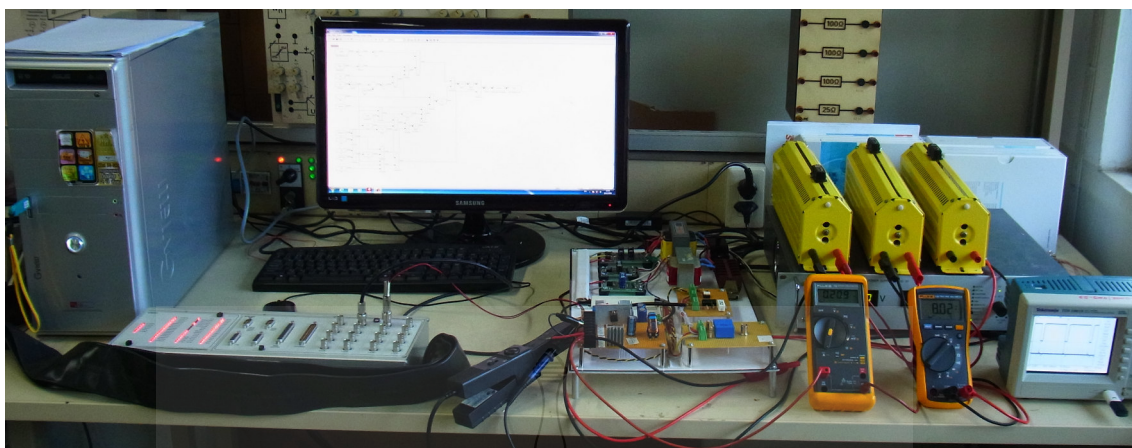




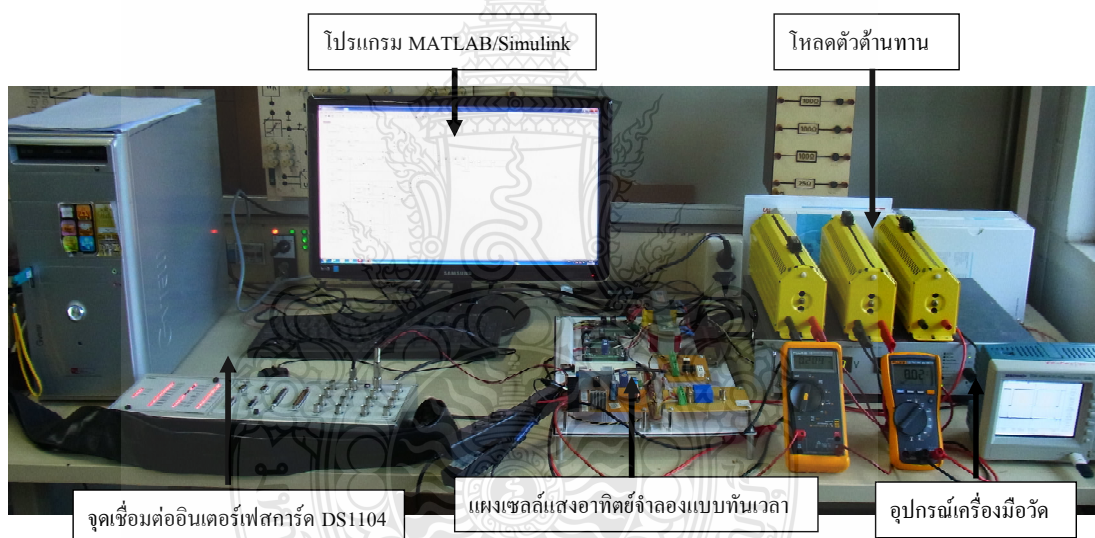
ภาพที่ 3.12 วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าขาออก



ภาพที่ 3.13 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์



ภาพที่ 3.14 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา



ภาพที่ 3.15 รายละเอียดส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

### 3.7 สรุปสาระสำคัญท้ายบท

การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยการเชื่อมต่อโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลานั้น เริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ Block ต่างๆภายในส่วนของ Simulink มาประกอบเข้าด้วยกัน โดยผลของการจำลองจะได้ค่าของกำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบเพื่อตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในขั้น



ต่อมาเป็นการออกแบบสร้างวงจรทอนระดับไฟตรงเพื่อทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ได้ตามพิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ จุดสำคัญของงานวิจัยนี้คือ การใช้การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 เชื่อมต่อกันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรทอนระดับไฟตรงเพื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามพฤติกรรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกกำหนดจากการปรับค่าความต้านทานส่วนแรงดันไฟฟ้าขาออกนั้นเกิดขึ้นจากวงจรตรวจจับกระแสขาออกส่งค่าไปให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟส ผลลัพธ์ของการทำงานร่วมกันจะได้เกิดพัลส์ควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีที ทำให้สามารถที่จะควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าขาออกตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง



## บทที่ 4

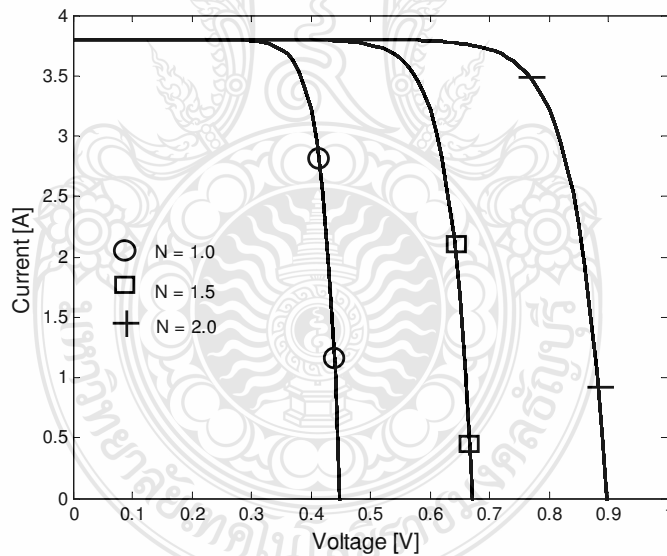
### ผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยผลการจำลองผลกระทบของตัวแปรทั้ง 5 ของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่าฟิลล์แฟคเตอร์เพื่อความเข้าใจในหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงผลการจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนสุดท้ายเป็นผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

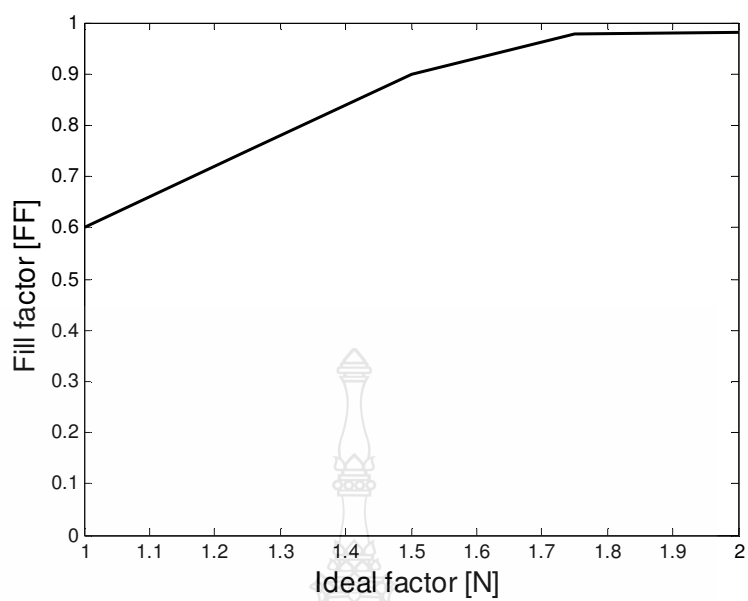
#### 4.1 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังในภาพที่ 3.4 สามารถจำลองผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ทางไฟฟ้า ได้ดังต่อไปนี้

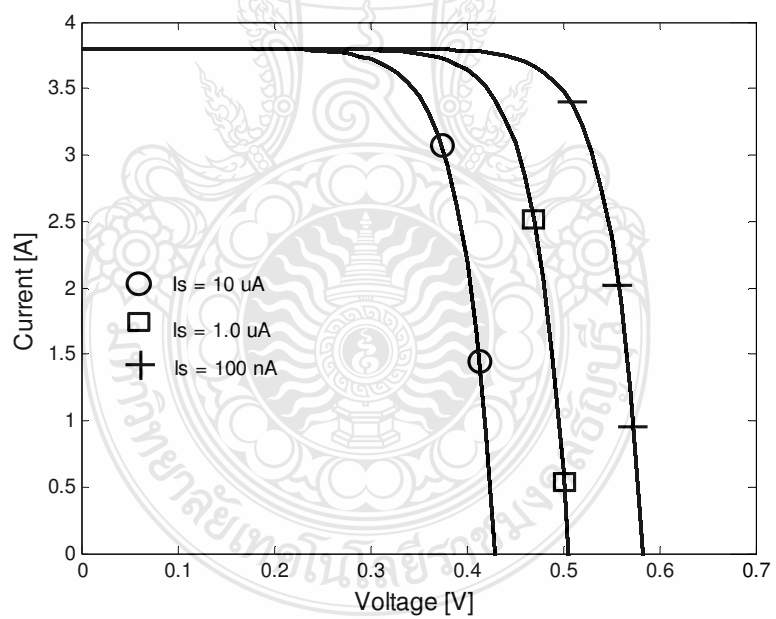
##### 4.1.1 ผลของไดโอด (Ideality Factor of the Diode and Reverse Saturation Current of Diode)



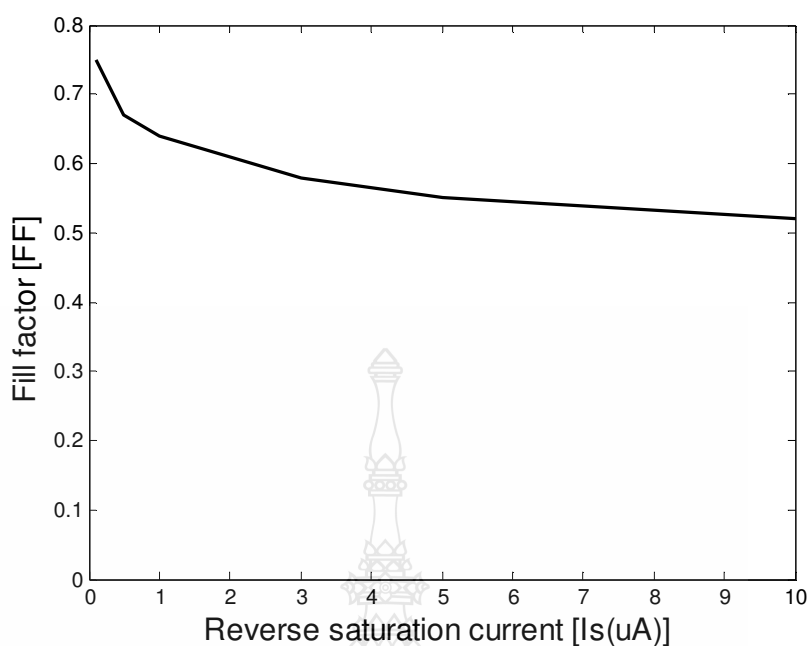
ภาพที่ 4.1 ผลกระทบของค่า N ต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.2 ผลกระทบของค่า  $N$  ต่อค่าฟิลล์แฟคเตอร์



ภาพที่ 4.3 ผลกระทบของค่า  $I_s$  ต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์

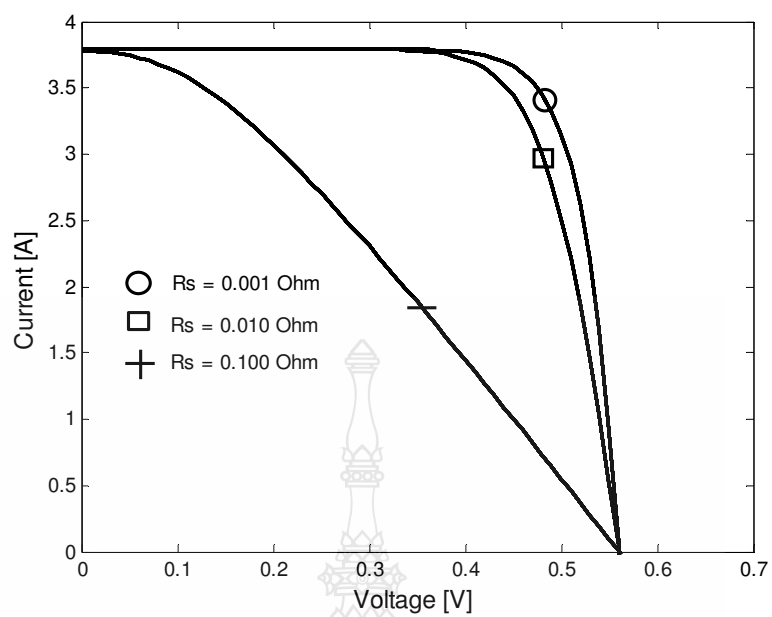


ภาพที่ 4.4 ผลกระทบของค่า  $I_s$  ต่อค่าฟิลล์แฟคเตอร์

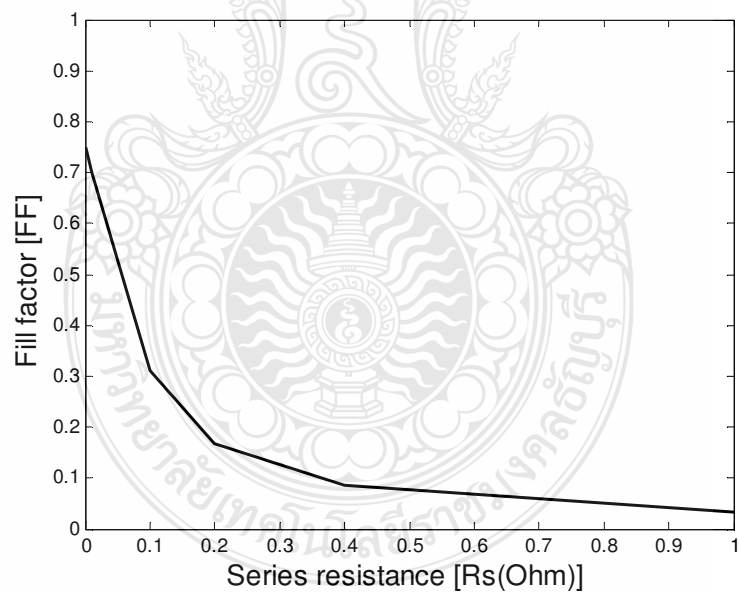
ค่า  $N$  และ  $I_s$  เป็นผลของไดโอด โดยที่ค่า  $N$  ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตโครงสร้างของเซลล์ เมื่อค่า  $N$  มีค่ามากขึ้นคือ 1.0, 1.5 และ 2.0 จะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้นตามภาพที่ 4.1 ส่งผลให้ค่า FF มีค่ามากขึ้นตามภาพที่ 4.2 ส่วนค่ากระแสไฟฟ้ารั่วในสภาวะอิ่มตัวจะจ่ายไปกลับนั้น เมื่อค่า  $I_s$  มีค่ามากขึ้นคือ 100nA, 1uA และ 10uA จะทำให้แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงตามภาพที่ 4.3 ซึ่งส่งผลให้ FF มีค่าลดลงตามภาพที่ 4.4

4.1.2 ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) และความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)

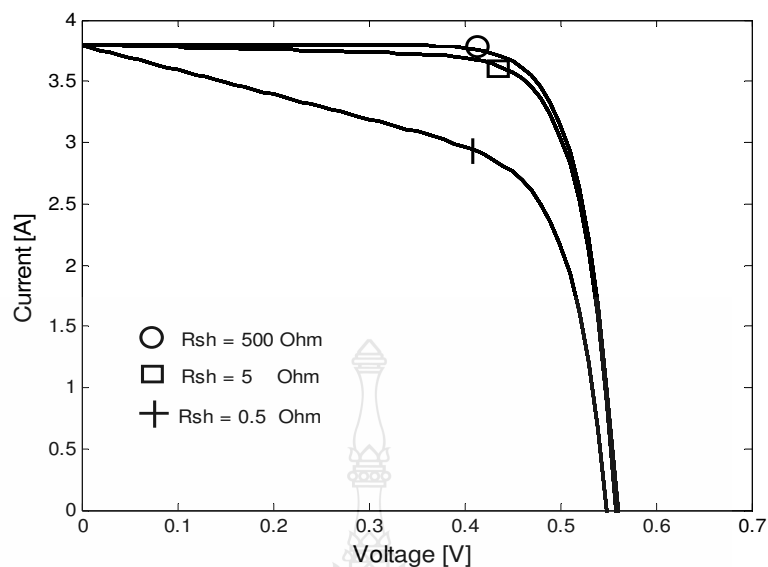
ค่า  $R_s$  เป็นค่าความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นร่วมกับค่าความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก [7] เมื่อ  $R_s$  มีค่ามากขึ้นคือ 1m $\Omega$ , 0.01 $\Omega$  และ 1 $\Omega$  จะทำให้กราฟกระแส - แรงดันมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมตามภาพที่ 4.5 ซึ่งส่งผลให้ FF มีค่าลดลงตามภาพที่ 4.6



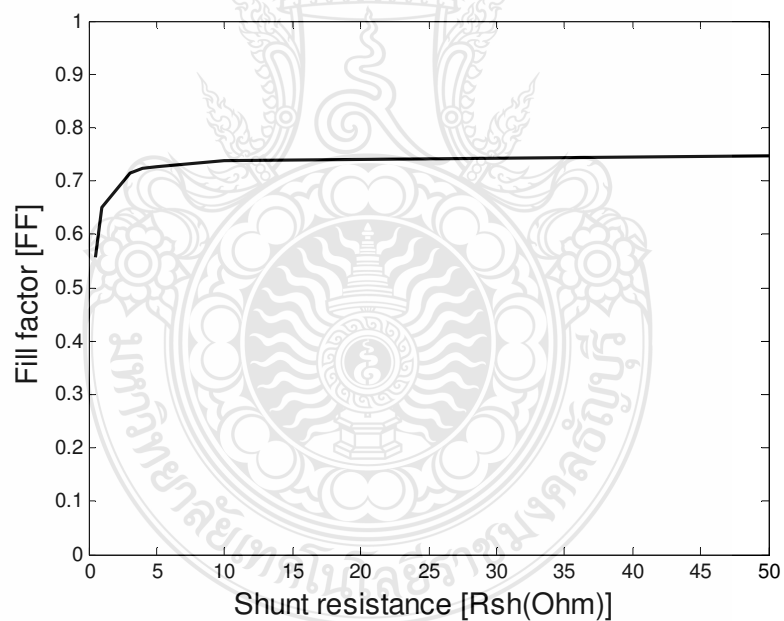
ภาพที่ 4.5 ผลกระทบของค่า  $R_s$  ต่อกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.6 ผลกระทบของค่า  $R_s$  ต่อค่าฟิลล์แฟคเตอร์



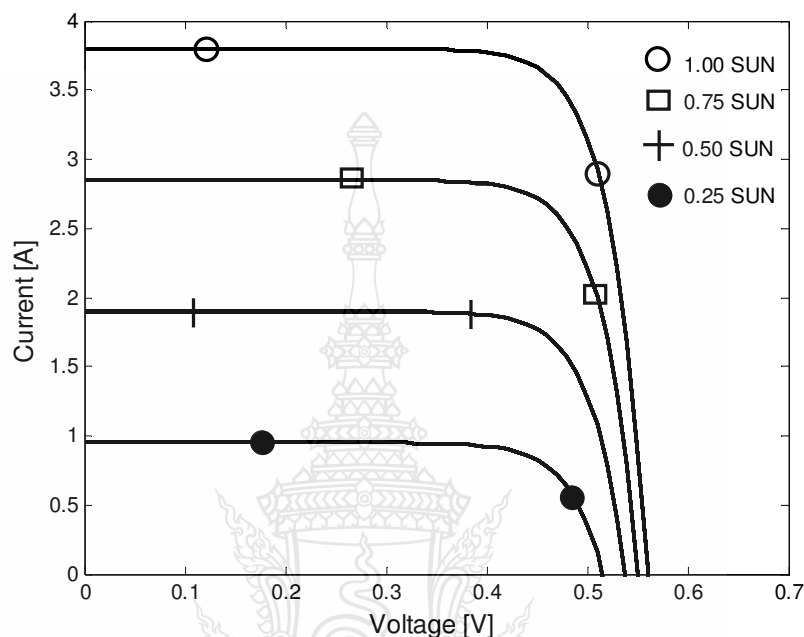
ภาพที่ 4.7 ผลกระทบของค่า  $R_{sh}$  ต่อดัชนีกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.8 ผลกระทบของค่า  $R_{sh}$  ต่อดัชนีฟิลล์แฟคเตอร์

ส่วนค่า  $R_{sh}$  นั้นเป็นการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ P - N Junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับขอบของเซลล์ [7] เมื่อ  $R_{sh}$  มีค่าลดลง

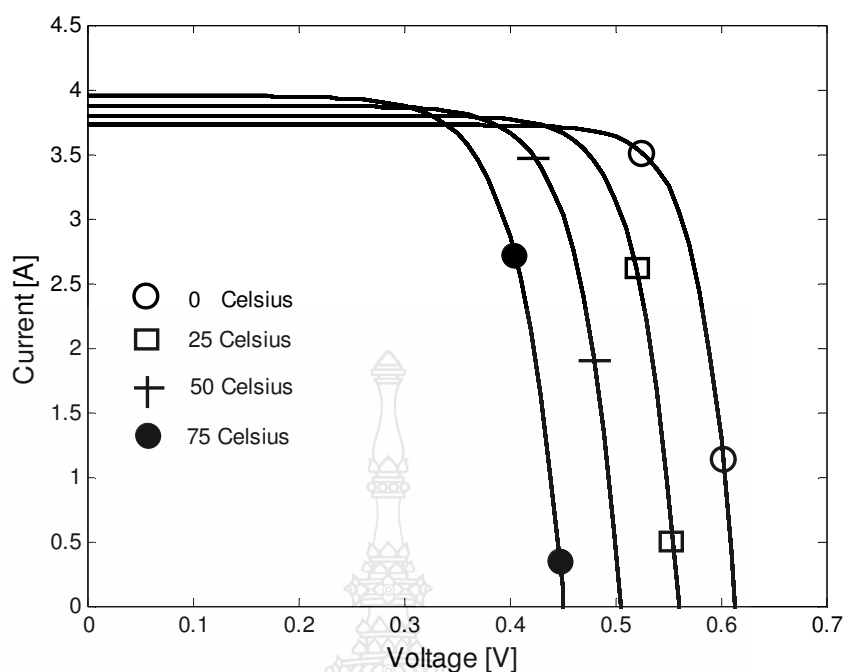
คือ  $50\ \Omega$ ,  $5\ \Omega$  และ  $0.5\ \Omega$  ทำให้กราฟกระแส - แรงดันมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมแต่ไม่มากนักโดยความต้านทานต้องมีค่าต่ำมากจึงจะเห็นผลการเปลี่ยนแปลงตามภาพที่ 4.7 ซึ่งส่งผลให้ FF มีค่าลดลงตามภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.9 ผลกระทบของค่า  $\lambda$  ต่อกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 4.1.3 ผลของความเข้มแสง (Solar Irradiance) และอุณหภูมิ (Cell Temperature)

ความเข้มแสงเป็นตัวแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนด  $I_{sc}$  เป็น  $3.8\text{A}$  ที่ STC (ความเข้มแสง  $1000\text{ W/m}^2$  อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  และ AM เป็น 1.5) ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสงเป็น 1.00 SUN, 0.75 SUN, 0.50 SUN และ 0.25 SUN ( $T = 25^\circ\text{C}$ ) ได้ผลกราฟ I - V Curve ตามภาพที่ 4.9 ส่วนอุณหภูมิของแผงเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่รอยต่อ P - N มีพลังงานในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสตรงเพิ่มขึ้นตามแต่ไม่มากนักในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าอุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  และ  $75^\circ\text{C}$  ( $\lambda = 1000\text{ W/m}^2$ ) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันขาออกจะลดลงได้ผล I - V Curve ตามภาพที่ 4.10 ดังนั้นในการติดตั้งใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิด้วย

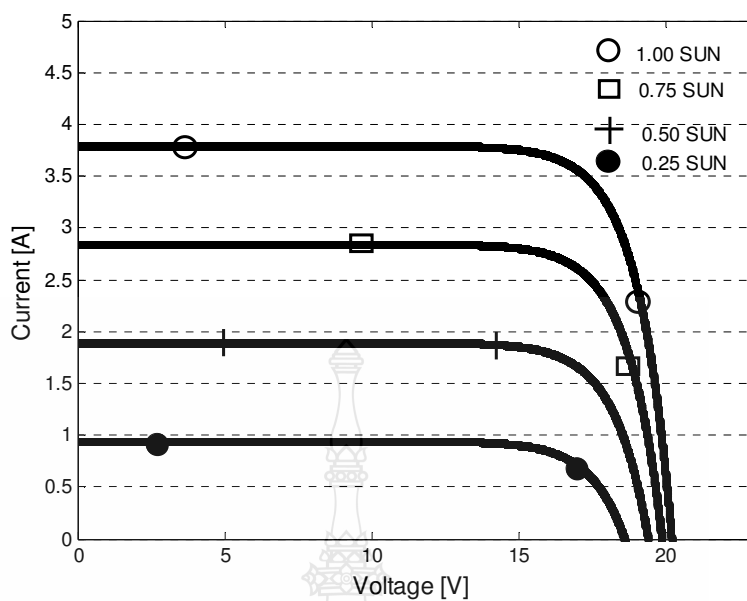


ภาพที่ 4.10 ผลกระทบของค่า T ต่อกราฟ I - V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

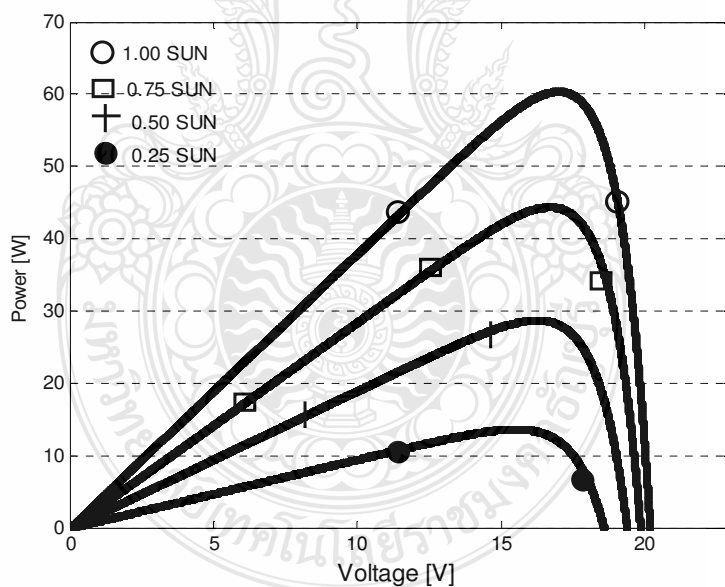
#### 4.2 ผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมและสะดวกในการใช้งานทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานและอนุกรมกัน ในการจำลองได้นำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์ และจำนวนทางขนานเป็น 1 ได้ผลกราฟ I - V Curve ตามภาพที่ 4.11 และกราฟ P - V Curve ภาพที่ 4.12 โดยในตารางที่ 4.1 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบ โมดูลกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX - 60 โดยเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 1.02% ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า 0.64% และความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 1.71% ซึ่งมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เชื่อมต่อกับการรันคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณจริงต่อไป

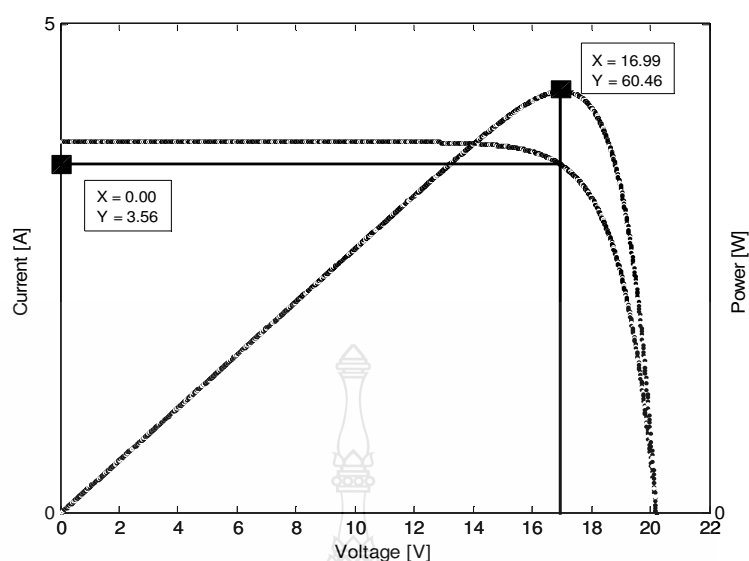




ภาพที่ 4.11 ผลกระทบของค่า  $\lambda$  ต่อกราฟ I - V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.12 ผลกระทบของค่า  $\lambda$  ต่อกราฟ P - V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.13 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ MSX - 60

Value	MSX - 60	Simulation	Error
$P_{max}$ (W)	9.85	60.46	-1.02%
$V_{mp}$ (V)	17.1	16.99	0.64%
$I_{mp}$ (A)	3.5	3.56	-1.71%

#### 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างสมการเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ใน DS1104 ซึ่งทำหน้าที่คำนวณแรงดันอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่าดิโอดีไซเคิลให้กับวงจรทอนระดับแรงดัน (BUCK Converter) โดยใช้ค่ากระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ เป็นอินพุต และอีกส่วนหนึ่งคือวงจรภาคกำลังซึ่งเป็นส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวต้านทาน โดยตัวต้านทาน  $60 \Omega$  ที่ได้ต่อในวงจรทำหน้าที่คงค่าคุณลักษณะของวงจรทอนระดับแรงดันที่ได้ออกแบบไว้ หากไม่มีจะทำให้การปรับค่าดิโอดีไซเคิลมีความคลาดเคลื่อน

##### 4.3.1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

1) Power Supply (Delta Elektronika SM 52 - 30)	1	เครื่อง
2) DS1104 Controller Broad	1	เครื่อง

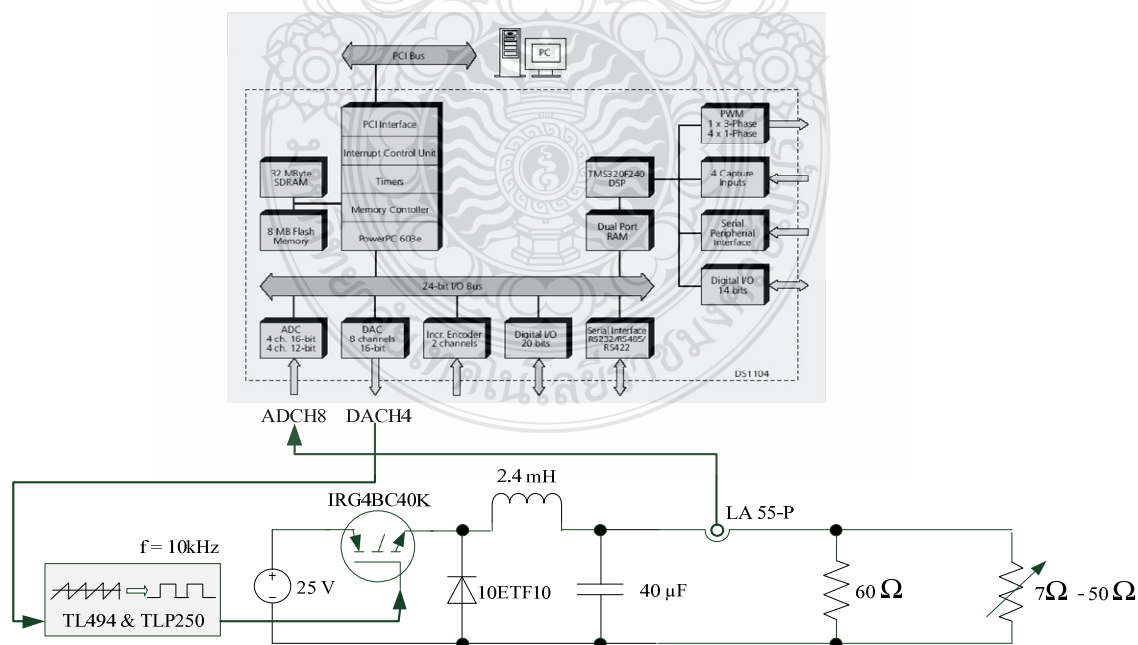
3) Computer (PC)	1	เครื่อง
4) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง	1	แผง
5) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 325Ω, 1.2A	1	ตัว
6) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 170Ω, 1.7A	1	ตัว
7) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 15Ω, 5.5A	1	ตัว
8) ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป	1	เครื่อง
9) ดิจิตอล มัลติมิเตอร์	2	เครื่อง

#### 4.3.2 วงจรการทดลอง

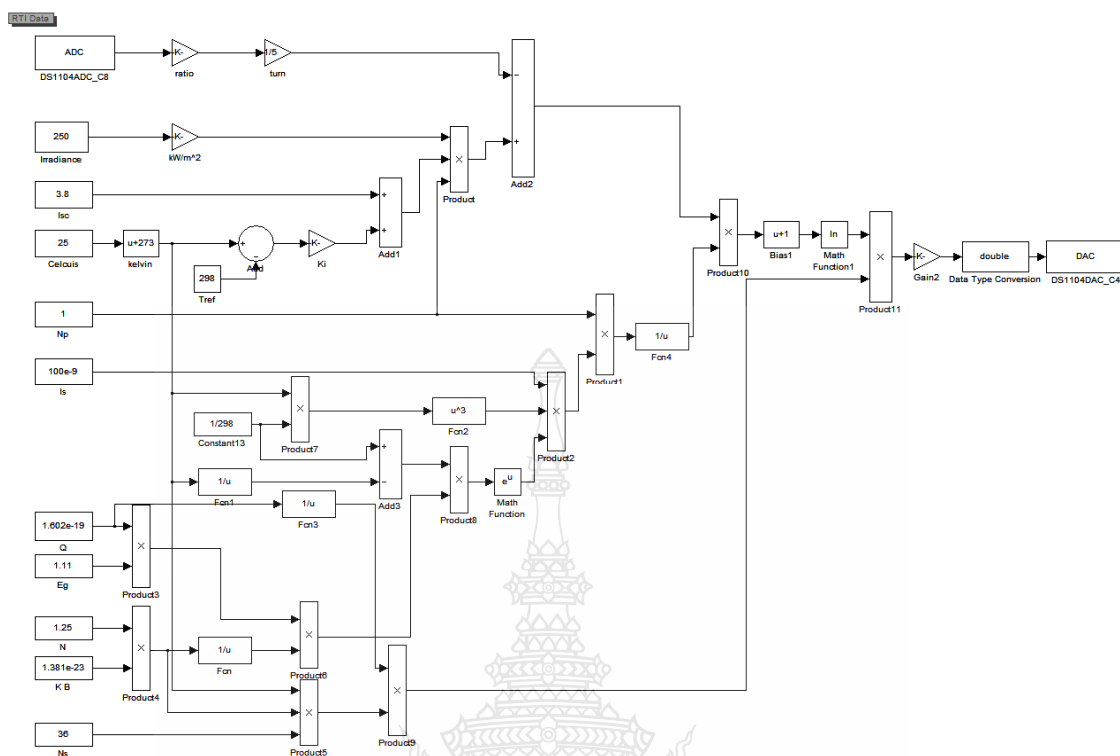
การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เชื่อมต่อวงจรภาคกำลัง ภาคควบคุมและโหลดตัวต้านทาน
- 2) เปิดแบบจำลอง MATLAB/Simulink แล้วทำการคอมไพล์ DSP Code
- 3) ปรับค่าความต้านทานเพื่อกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าขาออก
- 4) บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออก
- 5) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

- 6) สรุปผลการทดลอง



ภาพที่ 4.14 วงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง



ภาพที่ 4.15 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ภายใน DS1104

#### 4.3.3 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง $250\text{W/m}^2$ อุณหภูมิ $25^\circ\text{C}$

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า  $7\ \Omega$  -  $50\ \Omega$  เพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าในการจำลอง ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปคำนวณค่าตัวชี้วัดในการขับเคลื่อนการขับเคลื่อนโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink (ผ่านอุปกรณ์ DS1104) เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 250\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ )

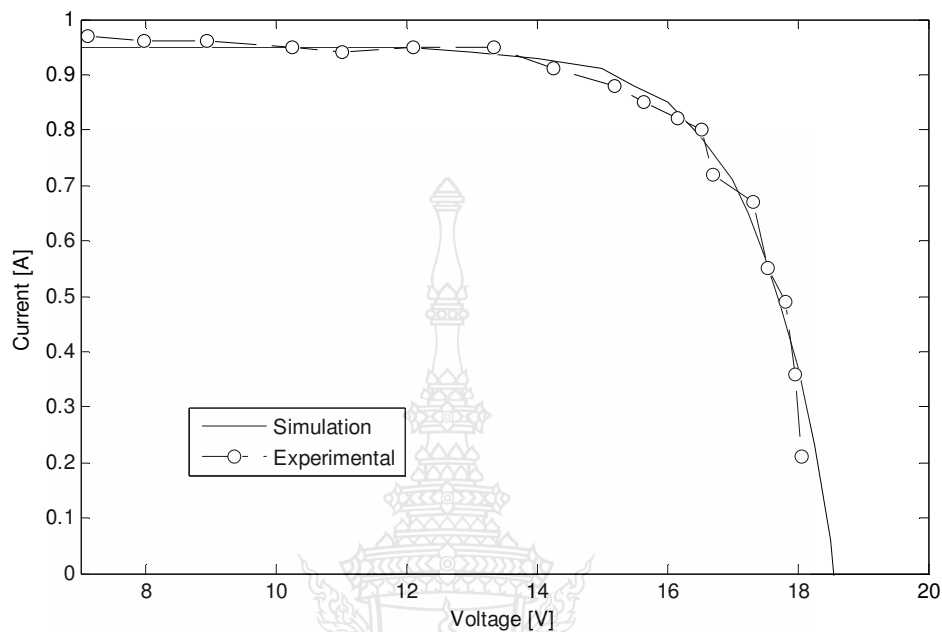
ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
7.00	0.95	6.65	7.12	0.97	6.91	-1.71	-2.11	-3.85
8.00	0.95	7.60	7.98	0.96	7.66	0.25	-1.05	-0.80
9.00	0.95	8.55	8.95	0.96	8.59	0.55	-1.05	-0.49
10.0	0.95	9.50	10.24	0.95	9.73	-2.40	0.00	-2.40

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 250\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ) (ต่อ)

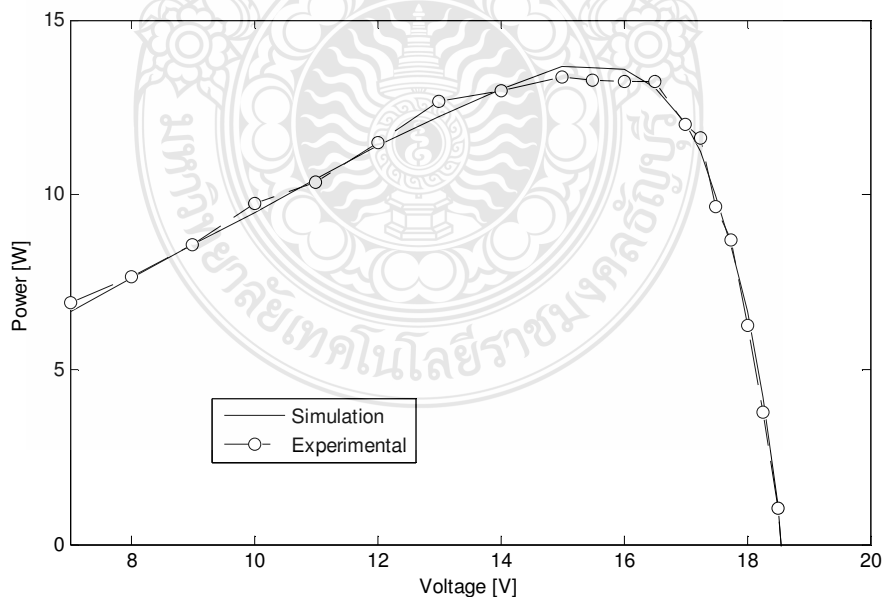
ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
11.0	0.95	10.45	11.02	0.94	10.36	-0.18	1.05	0.87
12.0	0.95	11.40	12.11	0.95	11.50	-0.92	0.00	-0.92
13.0	0.94	12.22	13.33	0.95	12.66	-2.54	-1.06	-3.63
14.0	0.93	13.02	14.25	0.91	12.96	-1.79	2.15	0.40
15.0	0.91	13.65	15.20	0.88	13.37	-1.33	3.30	2.00
15.5	0.88	13.64	15.64	0.85	13.29	-0.90	3.41	2.54
16.0	0.85	13.60	16.16	0.82	13.25	-1.00	3.53	2.56
16.5	0.79	13.04	16.52	0.80	13.22	-0.12	-1.26	-1.39
17.0	0.71	12.07	16.71	0.72	12.03	1.71	-1.41	0.32
17.25	0.65	11.21	17.31	0.67	11.60	-0.35	-3.08	-3.43
17.50	0.57	9.98	17.53	0.55	9.64	-0.17	3.51	3.34
17.75	0.48	8.52	17.81	0.49	8.72	-0.34	-2.08	-2.43
18.00	0.37	6.66	17.96	0.36	6.24	0.22	2.70	2.92
18.25	0.23	4.20	18.05	0.21	3.79	1.10	8.70	9.70
18.50	0.06	1.11						

จากตารางที่ 4.2 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 13.65W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 15V กระแสไฟฟ้า 0.91A ( $\lambda = 250\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ) และในช่องของการทดลองนั้นจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 13.37W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 15.2V กระแสไฟฟ้า 0.88A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 2.00% ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า 1.33% และความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 3.3% นอกจากนั้นในตารางที่ 4.2 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V – 18.25V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ กระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.16 และกราฟความสัมพันธ์

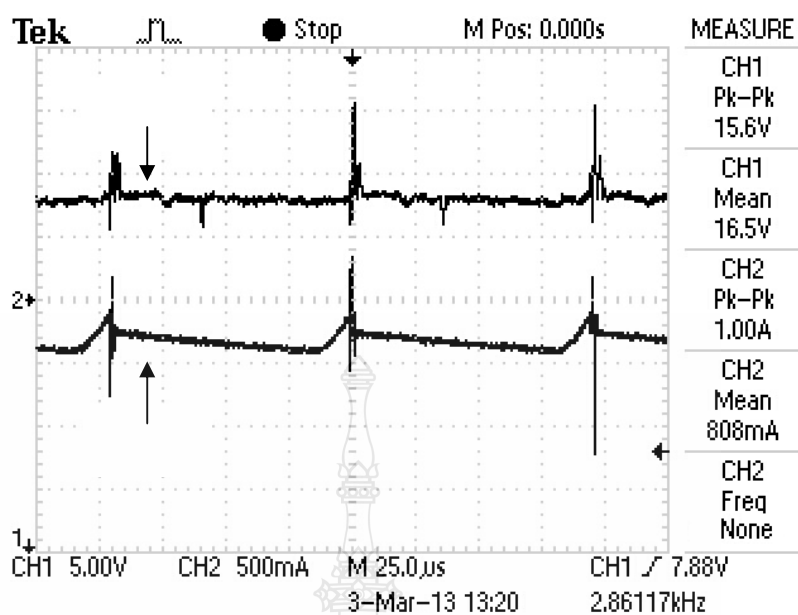
กำลังไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.17 ในส่วนของภาพที่ 4.18 และ 4.19 เป็นการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าขาออกในวงจรทอนระดับแรงดัน และสัญญาณชั้บเกตไอจีบีทีตามลำดับ



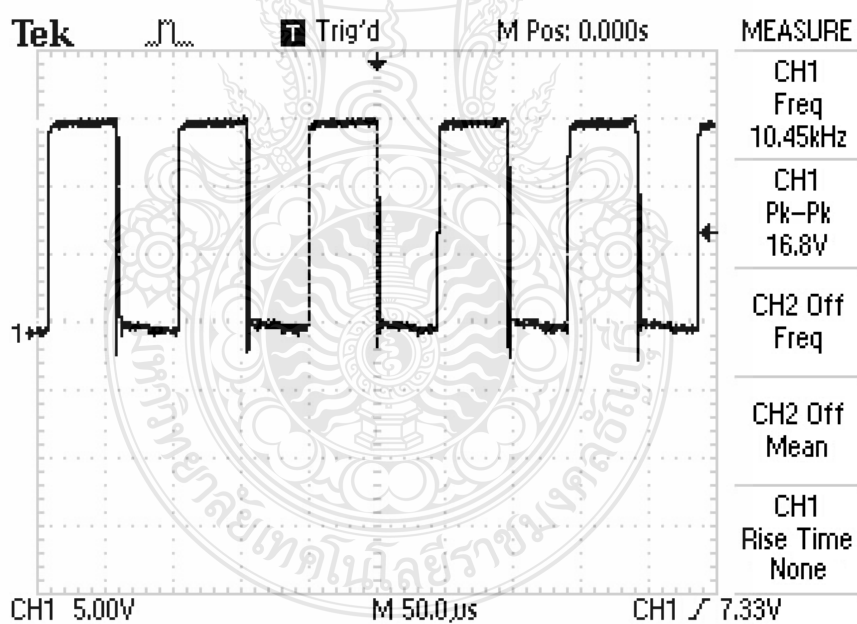
ภาพที่ 4.16 กราฟ I - V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $250\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ )



ภาพที่ 4.17 กราฟ P - V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $250\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ )



ภาพที่ 4.18 สัญญาณกระแสไฟฟ้าออกและแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรถอนระดับแรงดัน



ภาพที่ 4.19 สัญญาณขั้วเกตไอจีบีทีแบบสัญญาณจริง

#### 4.3.4 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง $500\text{W/m}^2$ อุณหภูมิ $25^\circ\text{C}$

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า 5  $\Omega$  - 42  $\Omega$  เพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าในการจำลอง ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปคำนวณค่าความผิดพลาด ในการขับเคลื่อนไอจีบีที โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink (ผ่านอุปกรณ์ DS1104) เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 ซึ่งในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 28.76 W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.25 V กระแสไฟฟ้า 1.77 A ( $\lambda = 500\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ) และในช่องของการทดลองนั้นจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 29.23W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.15 V กระแสไฟฟ้า 1.81 A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 1.63% ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า 0.61% และความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 2.26% นอกจากนั้นในตารางที่ 4.3 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7 V – 19.25 V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ กระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.19 และกราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.21 ในส่วนของภาพที่ 4.22 เป็นการแสดงสัญญาณขับเคลื่อนไอจีบีที ภาพที่ 4.23 และ 4.24 เป็นการแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าขาออกในวงจรตอนระดับแรงดันตามลำดับ

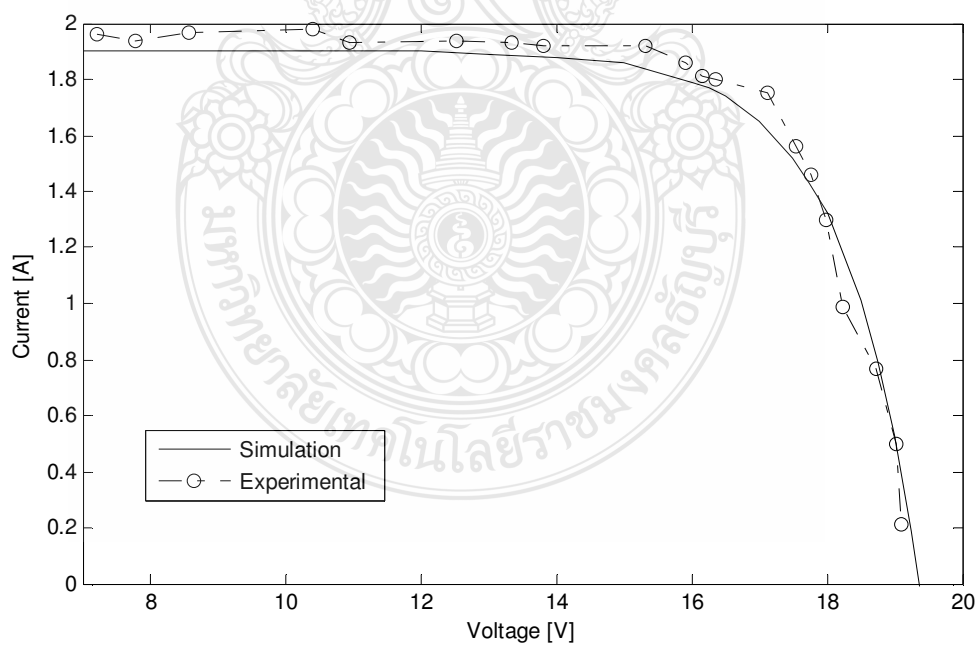
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 500\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ )

ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
7.00	1.90	13.3	7.22	1.96	14.15	-3.14	-3.16	-6.4
8.00	1.90	15.2	7.79	1.94	15.11	2.63	-2.10	0.58
9.00	1.90	17.1	8.56	1.97	16.86	4.89	-3.68	1.38
10.0	1.90	19.0	10.39	1.98	20.57	-3.90	-4.21	-8.27
11.0	1.90	20.9	10.95	1.93	21.13	0.45	-1.58	-1.12
12.0	1.90	22.8	12.52	1.94	24.29	-4.33	-2.11	-6.53
13.0	1.89	24.57	13.34	1.93	25.75	-2.62	-2.12	-4.79
14.0	1.88	26.32	13.82	1.92	26.53	1.29	-2.13	-0.81
15.0	1.86	27.90	15.32	1.92	29.41	-2.13	-3.22	-5.43

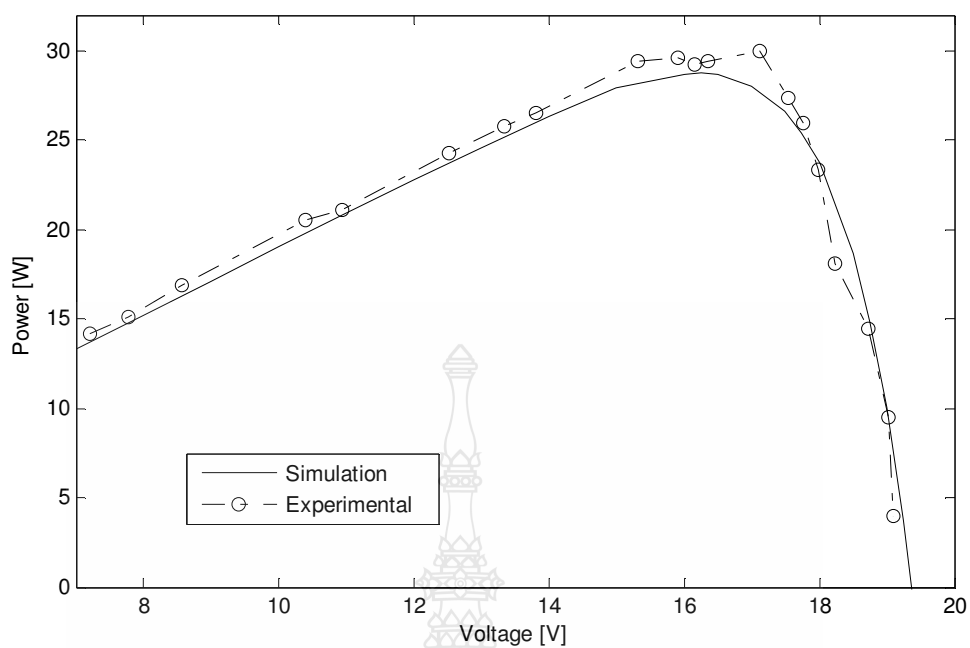


ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda=500 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ) (ต่อ)

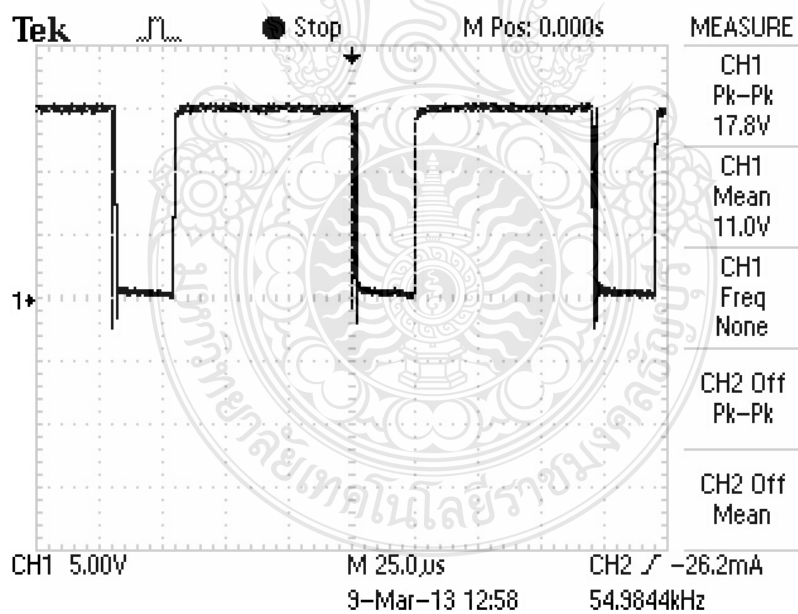
ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
16.0	1.79	28.64	15.91	1.86	29.59	0.56	3.91	-3.33
16.25	1.77	28.76	16.15	1.81	29.23	0.61	-2.26	-1.63
16.50	1.74	28.71	16.36	1.80	29.45	0.85	-3.45	-2.57
17.00	1.65	28.05	17.12	1.75	29.96	-0.71	-6.06	-6.81
17.50	1.52	26.60	17.55	1.56	27.38	-0.28	-2.63	-2.92
17.75	1.43	25.38	17.77	1.46	25.94	-0.11	-2.10	-2.21
18.00	1.32	23.76	17.99	1.30	23.39	0.05	1.52	1.57
18.50	1.01	18.69	18.24	0.99	18.06	1.41	1.98	3.36
18.75	0.79	14.81	18.72	0.77	14.41	0.16	2.53	2.69
19.00	0.53	10.07	19.02	0.50	9.51	-0.11	5.66	5.56
19.25	0.19	3.66	19.11	0.21	4.01	0.72	-10.5	-9.72



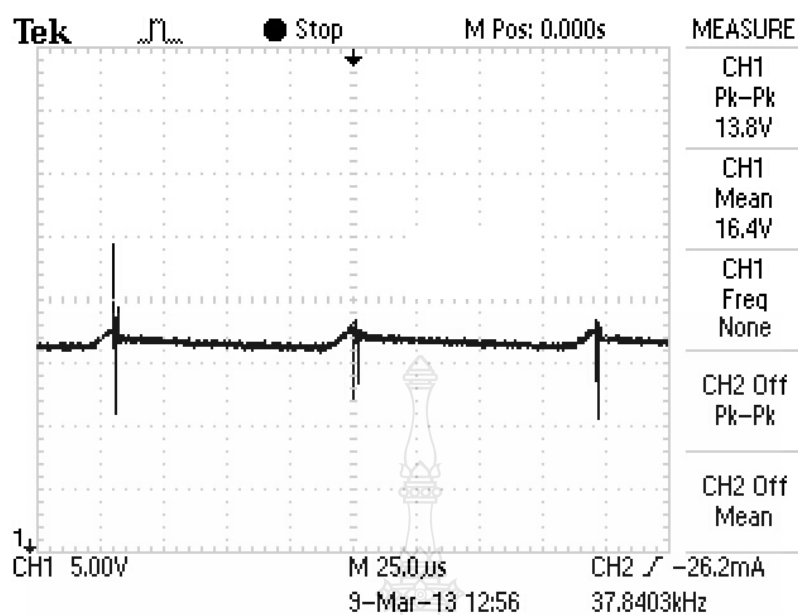
ภาพที่ 4.20 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $500\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ )



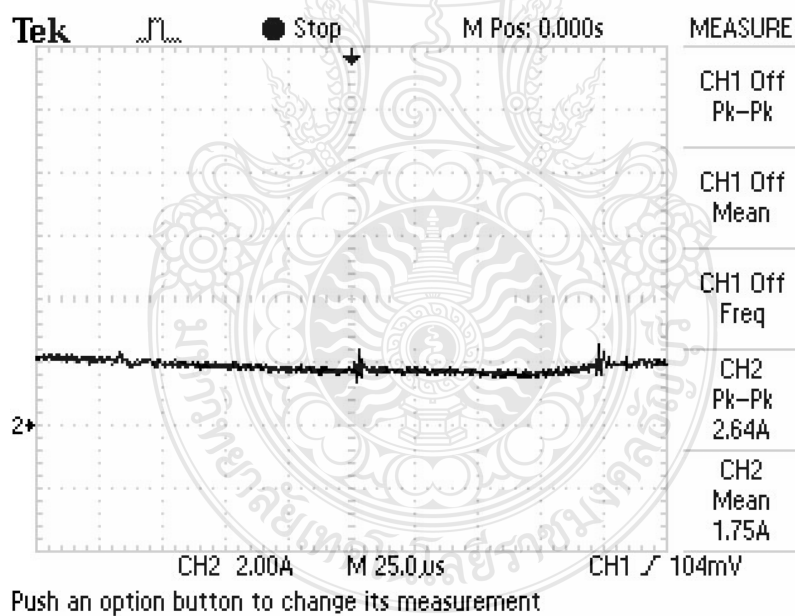
ภาพที่ 4.21 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $500\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ )



ภาพที่ 4.22 สัญญาณขั้วเกตไอจีบีทีแบบสัญญาณจริง



ภาพที่ 4.23 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรถอนระดับแรงดัน



ภาพที่ 4.24 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรถอนระดับแรงดัน

#### 4.3.5 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง $250\text{W/m}^2$ อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า  $8\ \Omega$  -  $55\ \Omega$  เพื่อให้ค่า

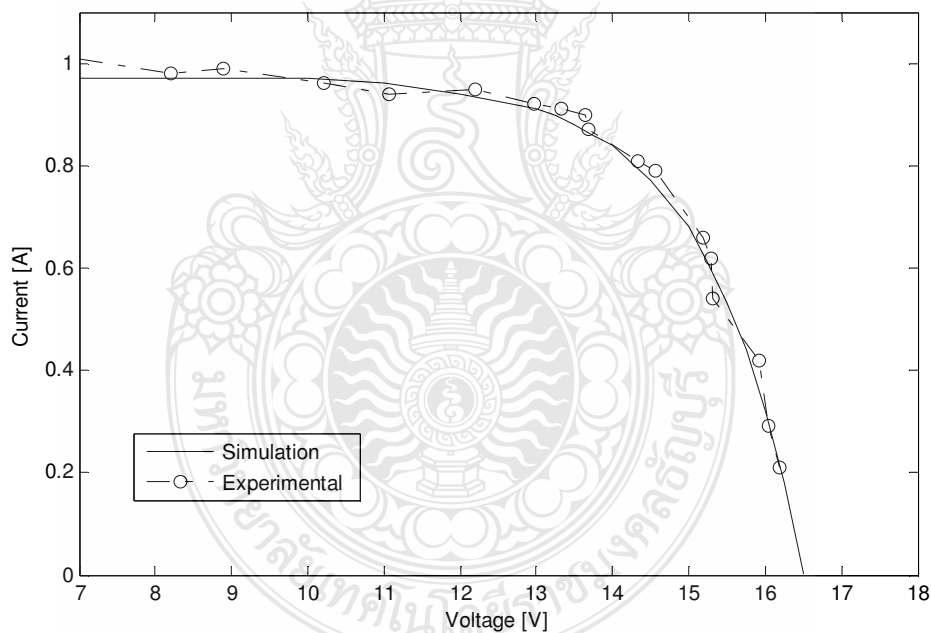
กระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าในการจำลอง ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปคำนวณค่าความผิดพลาด ในการจับเกตไอจีบีที โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink (ผ่านอุปกรณ์ DS1104) เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4 ซึ่งในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ  $11.93\text{W}$  เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า  $13.25\text{ V}$  กระแสไฟฟ้า  $0.9\text{A}$  ( $\lambda = 250\text{W/m}^2$ ,  $T=50^\circ\text{C}$ ) และในช่องของการทดลองนั้นจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ  $12.12\text{ W}$  เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า  $13.32\text{ V}$  กระแสไฟฟ้า  $0.91\text{ A}$  ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า  $1.65\%$  ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า  $0.53\%$  และความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า  $1.11\%$  นอกจากนี้ในตารางที่ 4.4 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง  $7\text{ V} - 16.25\text{ V}$  ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ กระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.25 และกราฟความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.26

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 250\text{W/m}^2$ ,  $T=50^\circ\text{C}$ )

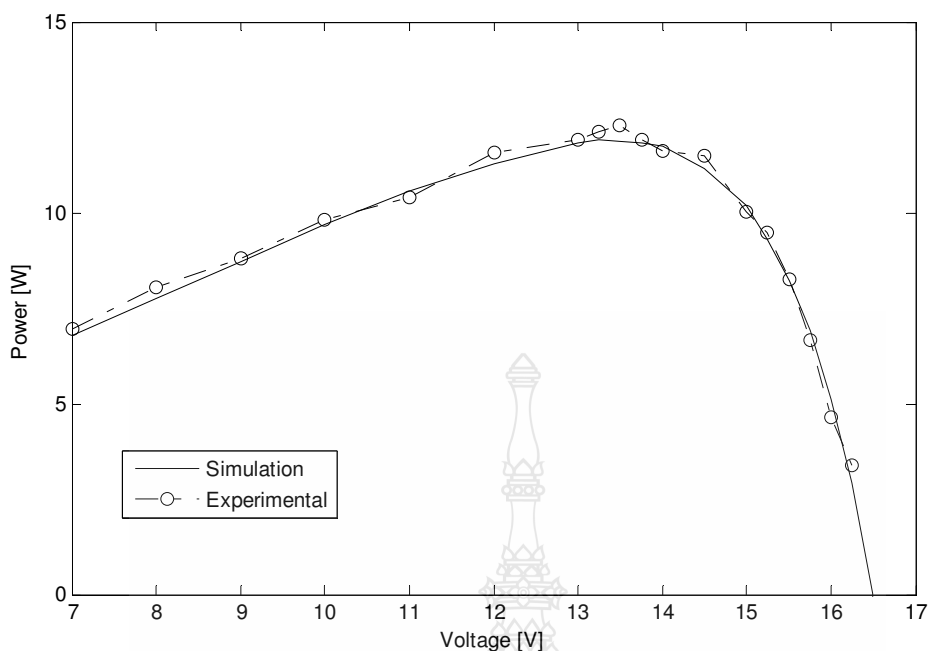
ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
7.00	0.97	6.79	6.89	1.01	6.96	1.57	-4.12	-2.49
8.00	0.97	7.76	8.21	0.98	8.04	-2.62	-1.03	-3.68
9.00	0.97	8.73	8.89	0.99	8.80	1.22	-2.06	-0.81
10.0	0.97	9.7	10.21	0.96	9.80	-2.1	1.03	-1.05
11.0	0.96	10.56	11.07	0.94	10.41	-0.63	2.08	1.46
12.0	0.94	11.28	12.19	0.95	11.58	-1.58	-1.06	-2.66
13.0	0.91	11.83	12.97	0.92	11.93	0.23	-1.10	-0.86
13.25	0.90	11.93	13.32	0.91	12.12	-0.53	-1.11	-1.65
13.50	0.88	11.88	13.64	0.90	12.28	-1.04	-2.27	-3.33
13.75	0.86	11.83	13.69	0.87	11.91	0.44	-1.16	-0.72

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 250 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 50^\circ \text{C}$ ) (ต่อ)

ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
14.00	0.84	11.76	14.32	0.81	11.6	-2.29	3.57	1.37
14.50	0.77	11.17	14.55	0.79	11.49	-0.34	-2.60	-2.95
15.00	0.68	10.2	15.19	0.66	10.02	-1.27	2.94	1.71
15.25	0.61	9.30	15.29	0.62	9.48	-0.26	-1.64	-1.91
15.50	0.53	8.21	15.32	0.54	8.27	1.16	-1.89	-0.70
15.75	0.44	6.93	15.91	0.42	6.68	-1.01	4.54	3.57
16.00	0.32	5.12	16.04	0.29	4.65	-0.25	9.37	9.15
16.25	0.18	2.93	16.19	0.21	3.40	0.37	-16.6	-16.23



ภาพที่ 4.25 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $250 \text{ W/m}^2$ ,  $50^\circ \text{C}$ )



ภาพที่ 4.26 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $250\text{W/m}^2$ ,  $50^\circ\text{C}$ )

#### 4.3.6 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง $500\text{W/m}^2$ อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า  $4\Omega$  -  $40\Omega$  เพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าในการจำลอง ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปคำนวณค่าวัตต์ไซเคิล ในการขับเคลื่อนไอจีบีที โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink (ผ่านอุปกรณ์ DS1104) เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5

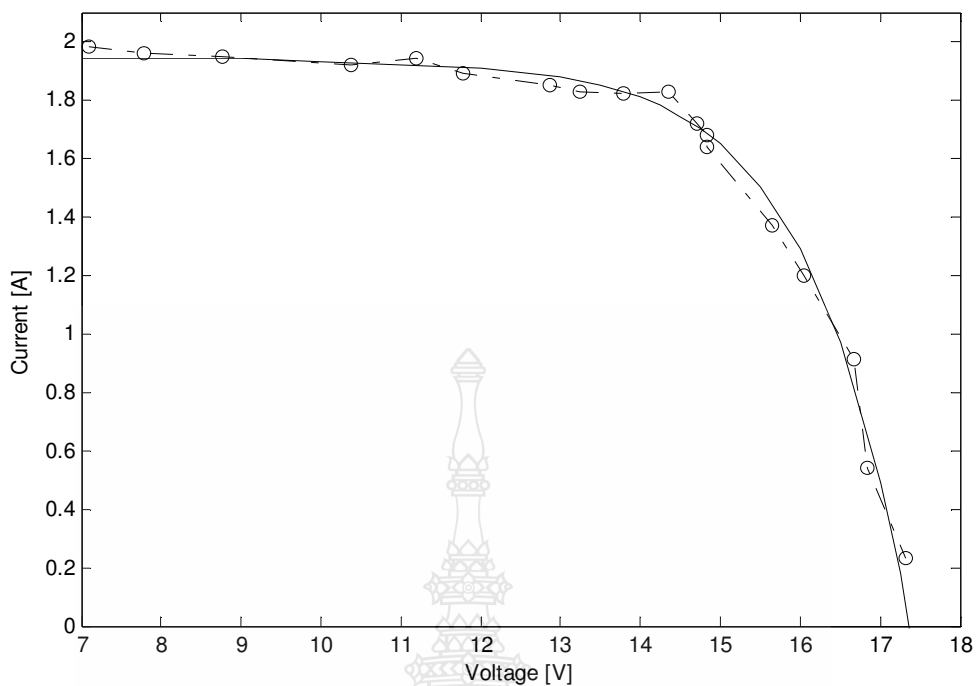
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 500\text{W/m}^2$ ,  $T = 50^\circ\text{C}$ )

ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
7.00	1.94	13.58	7.09	1.98	14.04	-1.28	-2.06	-3.37
8.00	1.94	15.52	7.79	1.96	15.27	2.63	-1.03	1.62
9.00	1.94	17.46	8.77	1.95	17.10	2.55	-0.51	2.05
10.0	1.93	19.3	10.38	1.92	19.93	-3.8	0.51	-3.26
11.0	1.92	21.12	11.20	1.94	21.73	-1.82	-1.04	-2.88

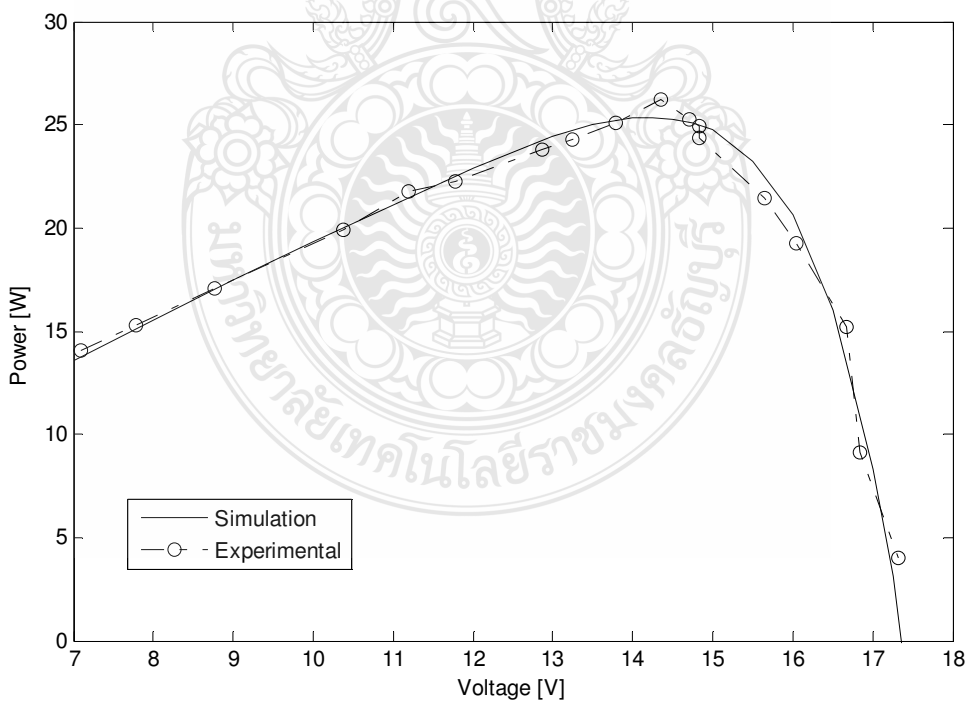
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ( $\lambda = 500 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 50^\circ \text{C}$ ) (ต่อ)

ค่าที่ได้จากการจำลอง			ค่าที่ได้จากการทดลอง			ความคลาดเคลื่อน		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)
12.0	1.91	22.92	11.78	1.89	22.26	1.83	1.05	2.86
13.0	1.88	24.44	12.87	1.85	23.81	1.00	1.60	2.58
13.5	1.85	24.98	13.25	1.83	24.25	1.85	1.08	2.91
14.0	1.81	25.34	13.78	1.82	25.08	1.57	-0.55	1.03
14.25	1.78	25.36	14.35	1.83	26.26	-0.7	-2.81	-3.53
14.50	1.74	25.23	14.70	1.72	25.28	-1.38	1.15	-0.21
14.75	1.70	25.08	14.83	1.68	24.91	-0.54	1.18	0.64
15.00	1.65	24.75	14.84	1.64	24.34	1.07	0.61	1.67
15.50	1.50	23.25	15.65	1.37	21.44	-0.97	8.67	7.78
16.00	1.29	20.64	16.05	1.20	19.26	-0.31	-6.97	6.67
16.50	0.97	16.00	16.67	0.91	15.17	-1.03	6.18	5.22
17.00	0.49	8.33	16.83	0.54	9.09	1.0	-10.2	-9.10
17.25	0.18	3.11	17.32	0.23	3.98	-0.41	-28.7	-28.29

จากตารางที่ 4.5 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 25.36 W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 14.25 V กระแสไฟฟ้า 1.78A ( $\lambda = 500 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 50^\circ \text{C}$ ) และในช่องของการทดลองนั้นจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 26.26W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 14.35 V กระแสไฟฟ้า 1.83 A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 3.53% ความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น 0.7% และความคลาดเคลื่อนของค่ากระแสไฟฟ้า 2.81% นอกจากนี้ในตารางที่ 4.5 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7 V – 17.25 V ซึ่งสามารถที่จะนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ กระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.27 และกราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.27 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $500\text{W/m}^2$ ,  $50^\circ\text{C}$ )



ภาพที่ 4.28 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติ ( $500\text{W/m}^2$ ,  $50^\circ\text{C}$ )



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือในส่วนแรกเป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ค่าองค์ประกอบอุดมคติของไดโอด ค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับของไดโอด ค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ ค่าความต้านทานขนานภายในเซลล์ ค่าความเข้มแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยนำเสนอในรูปแบบของการนำเสนอทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์มาเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สร้างเป็นแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ข้างต้นประโยชน์ที่ได้คือกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรข้างต้นกับพฤติกรรมของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ดังแสดงในบทที่ 4 ซึ่งทำให้มีความรู้ความเข้าใจมากยิ่งขึ้น ในส่วนที่สองเป็นการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง โดยสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้จริงโดยใช้วงจรทอนระดับแรงดันทำงานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้สร้างไว้ในส่วนแรกด้วยการเชื่อมต่อผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104 ประโยชน์ที่ได้คือสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาและวิเคราะห์ระบบควบคุมพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวม จากสองส่วนดังกล่าวสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

##### 5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าค่าองค์ประกอบอุดมคติของไดโอดที่มากขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่าฟิลล์แฟคเตอร์สูงขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับของไดโอดที่มากขึ้นทำให้ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ต่ำลง นั่นคือค่าผลของไดโอดมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ที่มากขึ้นมีผลต่อค่าฟิลล์แฟคเตอร์ที่ลดลงและค่าความต้านทานขนานภายในเซลล์ที่น้อยลงก็ทำให้ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ลดลงด้วยส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้ไม่ถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งค่าฟิลล์แฟคเตอร์ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ถ้ารับค่าความเข้มแสงจะเป็นตัวกำหนดกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ถ้าความเข้มแสงน้อยกระแสขาออกก็จะต่ำลงด้วย ค่าอุณหภูมิของแผงเซลล์ที่สูงขึ้นจะมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง

### 5.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

ระบบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสัญญาณจริงนั้นได้เลือกใช้วงจรภาคกำลังเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz ส่วนภาคควบคุมนั้นจะเป็นการควบคุมการมอดูเลตความกว้างพัลส์ให้ได้เหมาะสมกับกระแสไฟฟ้าขาออกที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้การปรับค่าที่โหลดตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ด้วยหลักการตรวจจับกระแสขาออกแล้วส่งไปยังอินเทอร์เฟซการ์ดเพื่อคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงสำหรับใช้ในการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลที่ได้คือแรงดันไฟฟ้าขาออกกับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันจะเป็นไปตามคุณลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการทดสอบเก็บผลบันทึกค่ากระแส แรงดันด้วยมัลติมิเตอร์และออสซิลโลสโคปใน 2 กรณีคือ ในกรณีแรกเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงโดยที่อุณหภูมิเป็น  $25^{\circ}\text{C}$  พบว่าที่ความเข้มแสงเป็น  $250\text{W}/\text{m}^2$  จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของการทดลองคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง 2.00% และที่ความเข้มแสง  $500\text{W}/\text{m}^2$  จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของการทดลองคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง 1.63% ส่วนในกรณีที่สองเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงโดยที่อุณหภูมิคงที่เป็น  $50^{\circ}\text{C}$  พบว่าที่ความเข้มแสงเป็น  $250\text{W}/\text{m}^2$  จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของการทดลองคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง 1.65% และที่ความเข้มแสง  $500\text{W}/\text{m}^2$  จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของการทดลองคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง 3.53% (ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าอื่นๆสามารถดูได้จากตารางที่ 4.2 – 4.5 ในบทที่ 4) นอกจากนั้นได้มีการนำผลการทดลองไปเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่ามีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนี้ทดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง โดยสามารถใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาและพัฒนา รวมทั้งส่งเสริมการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการศึกษาและพัฒนาสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง เพื่อการพัฒนาขั้นต่อไปควรกระทำดังนี้

5.2.1 เพิ่มพิกัดขนาดกำลังไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์ให้มากขึ้นตามสภาพการใช้งานจริง โดยอาจเป็นพิกัดกำลังไฟฟ้าแบบกลุ่มแผง (Array) เป็นต้น

5.2.2 เพิ่มระบบการควบคุมเข้าไปยังแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง เช่น ระบบการตรวจจับกำลังไฟฟ้าสูงสุด ก็จะทำให้การพัฒนาารบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดียิ่งขึ้น

5.2.3 พัฒนาแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ให้สามารถเลือกค่าตัวแปรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดสอบได้ เพื่อป้องกันการป้อนค่าตัวแปรผิดพลาด



## รายการอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, รายงานไฟฟ้าของประเทศไทย ๒๕๕๓
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, ความเข้มแสง และศักยภาพเชิงพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วประเทศ เข้าถึงได้จาก: <http://www.dede.go.th/dede/index.php>
- [3] Francisco M.Gonzalez-Longatt, **Model of Photovoltaic Module in Matlab**, IICIBELEC, 2005
- [4] Ho Lee Min-Jung Lee, Se-Na Lee, Hwa-Chun Lee, Hae-Kon Nam, Sung-Jun Parkn **Development of Photovoltaic Simulator based on DC-DC Converter**, INTELEC 09 – 31st International Telecommunications Energy Conference, 18-22 October 2009, Incheon, Korea
- [5] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG, **Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink**, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS, October 22-24, 2008, San Francisco, USA
- [6] A. Bilsalam J. Haema, I. Boonyaroonate nd V. Chunkag, **Simulation and Study of Photovoltaic Cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load**, 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea, pp3033-3036
- [7] บุญยัง ปลั่งกลาง, **Photovoltaic Systems**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [8] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri ,**Matlab/simulink based of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification**, International Journal of Energy and Environment, Volume 1 ,Issue 3,2010, pp. 487-500
- [9] Pilin Junsangsri and Fabrizio Lombardi. 2010, **Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model**, In 25<sup>th</sup> International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp. 240-248.
- [10] Wanchai Subsingha. 2008, **Power Electronic (Academic book)**, Thailand. RMUTT printing.
- [11] ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, **MATLAB/Simulink for Real-time control system with DS1104** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



**ภาคผนวก ก**

การใช้งานแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์





ตารางที่ ก.2 ค่า Ideality factor of the diode [5]

Factor N dependence on PV technology	
Technology	N
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si:H	1.8
a-Si:H tandem	3.3
a-Si:H triple	5
CdTe	1.5
CIS	1.5
AsGa	1.3

ในการจำลองกำหนดให้

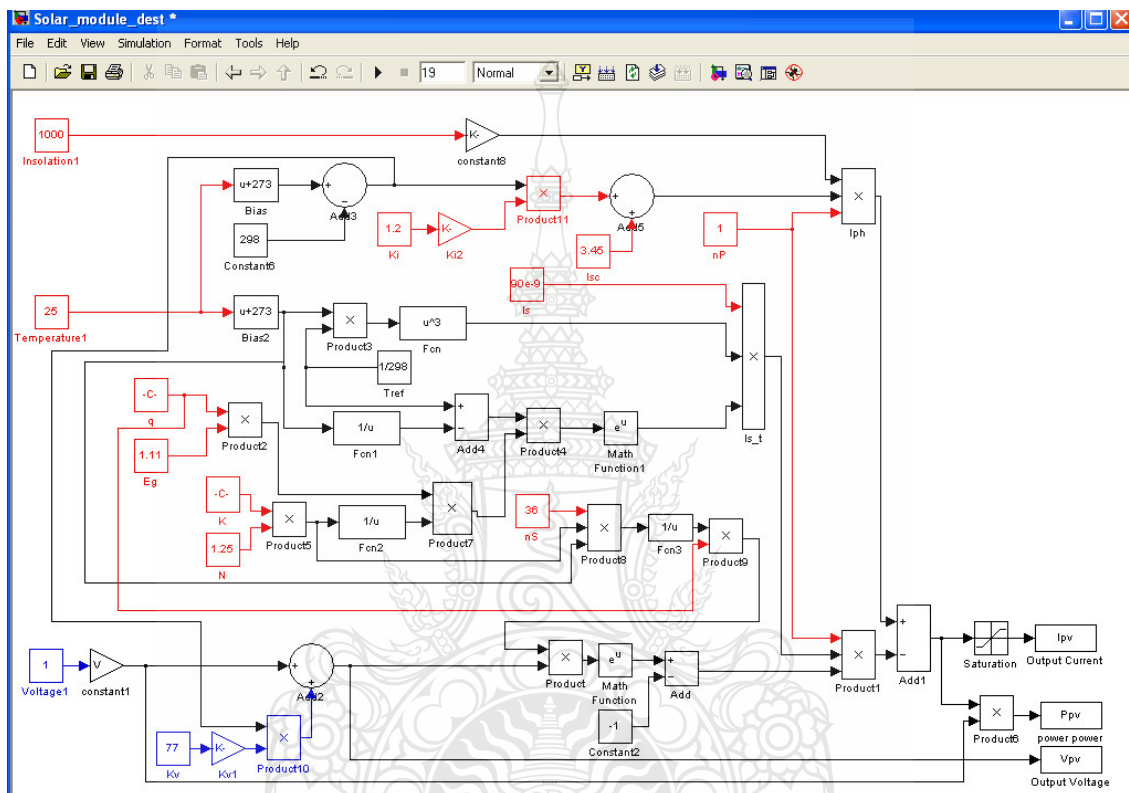
- Ideality factor of the diode (N) 1.25
3. กำหนดค่าพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์คือ
- Reverse saturation current of diode ( $I_s$ ) 90nA
- ค่าคงที่ที่ใช้ได้ทุกแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- Electron charge (q)  $1.602 \times 10^{-19}$  eV
  - Boltzmann's constant (K)  $1.381 \times 10^{-23}$  J/°K
  - Cell's reference temperature 298°K
  - Band gap energy of semiconductor 1.11
  - Number of series connected cells ( $N_s$ ) 36
  - Number of shunt connected cells ( $N_p$ ) 1
4. กำหนดค่าตัวแปรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทดสอบ
- Solar irradiance ( $\lambda$ )  $250 \text{ W/m}^2$  to  $1000 \text{ W/m}^2$
  - Working temperature (T)  $0^\circ\text{C}$  to  $75^\circ\text{C}$



- Voltage across the diode (V)

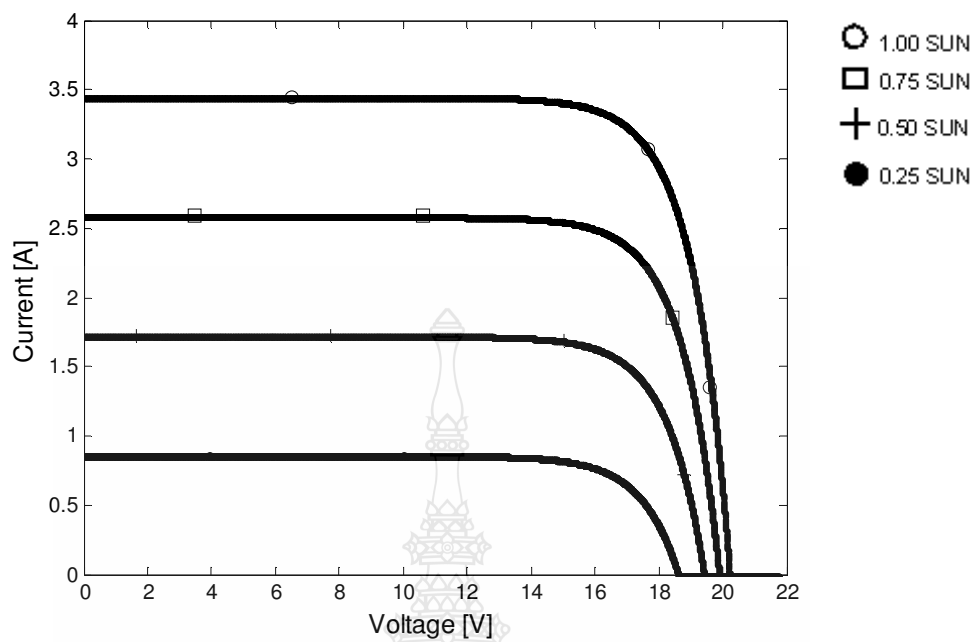
0V to  $V_{OC}$

5. กำหนดค่าตัวแปรในข้อ 1-4 ลงในแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังภาพที่ ก.1 แล้วทำการ Simulation โดยเก็บค่าผลการจำลองไว้ที่ Workspace

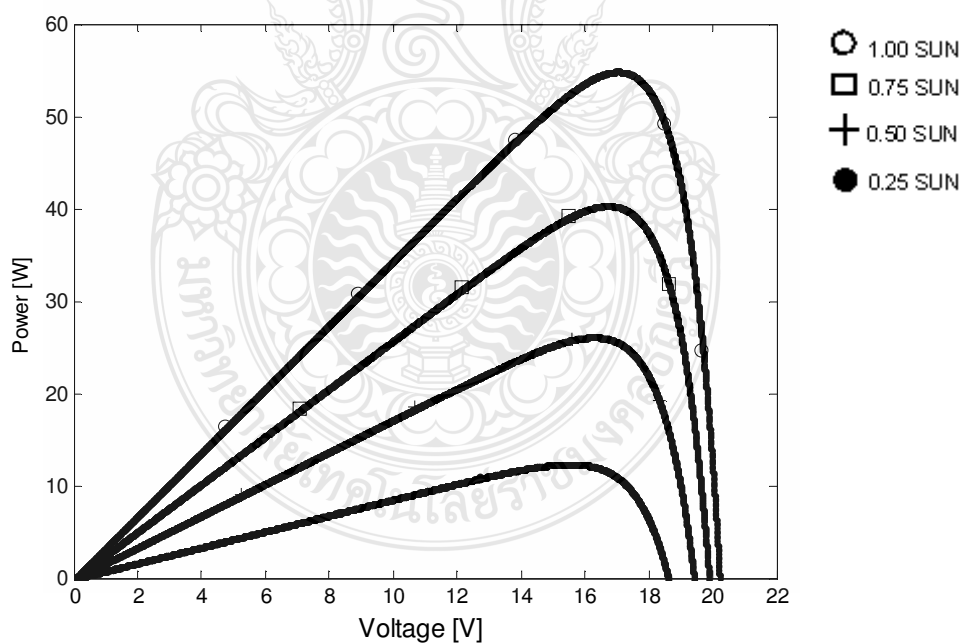


ภาพที่ ก.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

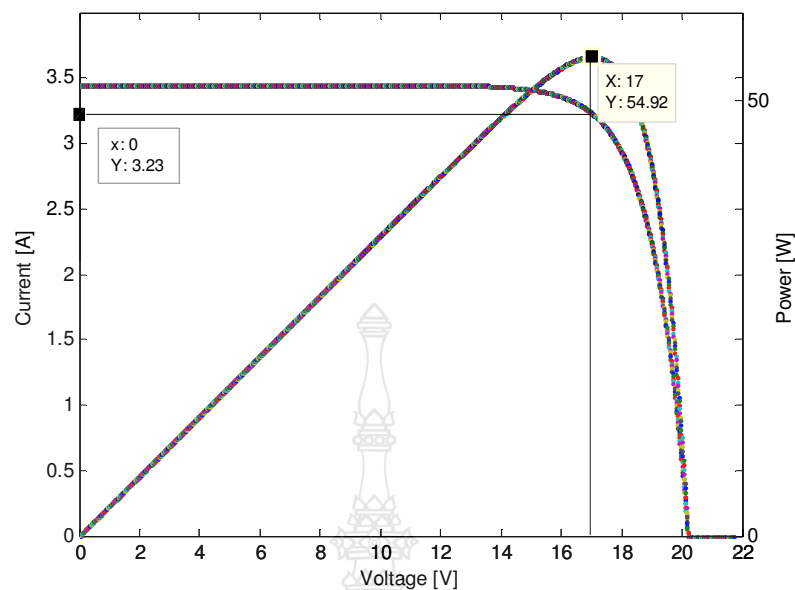
6. ใช้คำสั่งให้โปรแกรม MATLAB ทำการเขียนกราฟกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I - V Curve) และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (P - V Curve) ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน จากนั้นเปรียบเทียบหาความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้า สูงสุดระหว่างแบบจำลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับค่าคุณลักษณะของ SM55



ภาพที่ ก.2 ผลกระทบของค่า  $\lambda$  ต่อกราฟ I - V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SM55



ภาพที่ ก.3 ผลกระทบของค่า  $\lambda$  ต่อกราฟ P - V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SM55



ภาพที่ ก.4 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ ก.3 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะของ SM55

Value	SM55	Simulation	Error
$P_{max}$ (W)	54.81	54.92	-0.2%
$V_{mp}$ (V)	17.4	17.00	2.3%
$I_{mp}$ (A)	3.15	3.23	-2.54%

ผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบ โมดูลกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SIEMENS รุ่น SM55 โดยเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 0.2% ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า 2.3% และความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 2.54% จากผลการจำลองทั้ง MSX - 60 ในบทที่ 4 และ SM55 นั้นมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ในการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรุ่นอื่นๆ ได้ โดยมีความสะดวกและรวดเร็วในการศึกษาพฤติกรรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าการทดสอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง

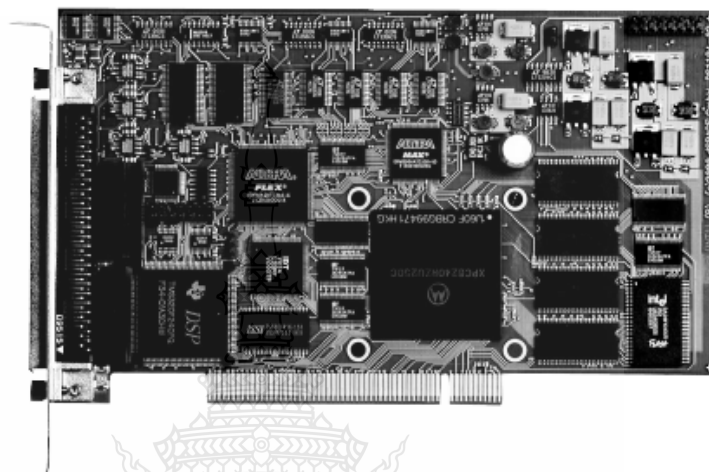


ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่สำคัญ

ข.1 ข้อมูลคุณลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104

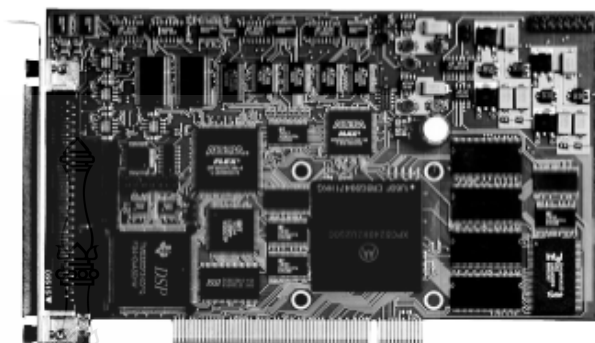
## DS1104 R&D Controller Board





## DS1104 R&D Controller Board

# A Powerful Prototyping System in Your PC



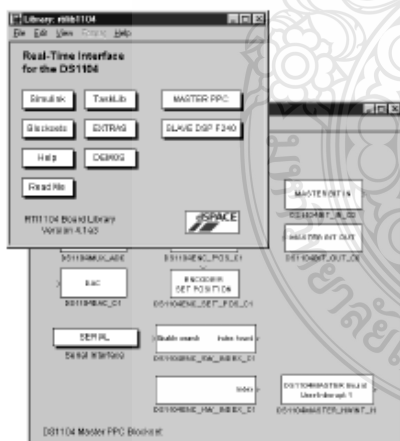
### Software Support

- DS1104 Real-Time Library (Included)
- Experiment and Platform Manager (Included)
- Programming from Simulink with Real-Time Interface RT1104
- Microtec C Compiler for PPC processor
- Experiment control with ControlDesk and MLIB/MTRACE

- Cost-effective system for controller development
- Single-board PCI hardware for use in PCs
- Set of intelligent I/O on-board
- Fully programmable from the Simulink block diagram environment

The DS1104 R&D Controller Board is a new piece of hardware that upgrades your PC to a powerful development system for rapid control prototyping. The real-time hardware based on PowerPC technology and its set of I/O interfaces makes the board an ideal solution for developing controllers in various industrial fields. The new DS1104 R&D Controller Board is impressive proof that power does not necessarily have to be expensive. The DS1104 offers an intelligent subset of the hardware architecture of the DS1103 PPC Controller Board, our long-running success. This way, the DS1104 is available at a reasonable price, making it the perfect development system for industry and equally for universities.

Yet it still gives you all the benefits of a dSPACE Prototyper system: full graphical configuration, programming in Simulink/Stateflow from The MathWorks and experiment control with state-of-the-art software tools. The board can be installed in virtually any PC with a free PCI slot. So why not make your PC a powerful development tool?



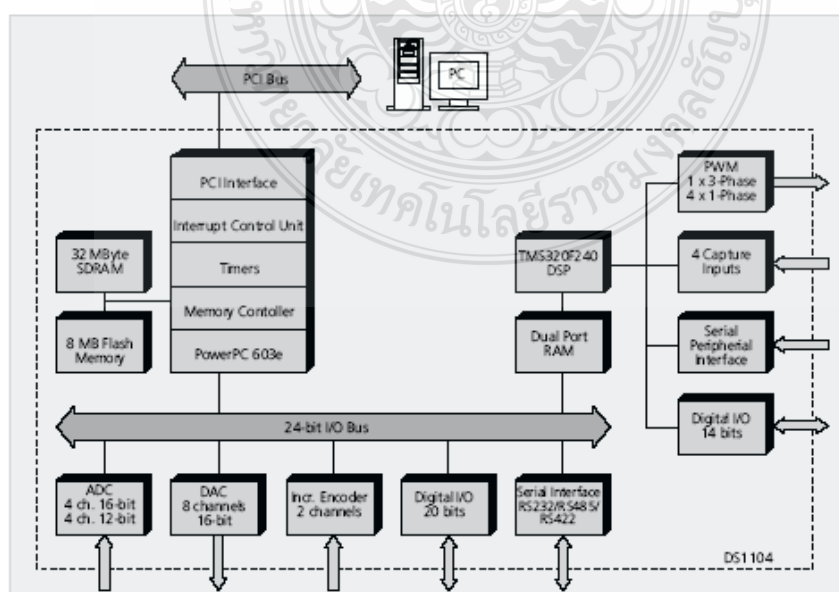
Real-Time Interface provides Simulink blocks for convenient configuration of A/D, D/A, digital I/O lines, incremental encoder interface and PWM generation.

### Technical Details

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Main Processor</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ MPC8240, PowerPC 603e core, 250 MHz</li> <li>■ 32 kByte internal cache</li> </ul>  |
| <b>Timers</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 sample rate timer, 32-bit downcounter</li> <li>■ 4 general purpose timers, 32 bit</li> <li>■ 64-bit timebase for time measurement</li> </ul> |

<b>Memory</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 32 MByte synchronous DRAM (SDRAM)</li> <li>■ 8 MByte boot flash for applications</li> </ul>	
<b>Interrupt Control Unit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Interrupts by timers, serial interface, slave DSP, incremental encoders, ADC, host PC and 4 external inputs</li> <li>■ PWM synchronous interrupts</li> </ul>	<b>Order Number</b>
<b>Analog Input</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 4 ADC inputs, 16 bit, multiplexed</li> <li>■ <math>\pm 10</math> V input voltage range</li> <li>■ 2 <math>\mu</math>s sampling time <sup>*)</sup></li> <li>■ &gt; 80 dB signal-to-noise ratio</li> <li>■ 4 ADC channels, 12 bit</li> <li>■ <math>\pm 10</math> V input voltage range</li> <li>■ 800 ns sampling time <sup>*)</sup></li> <li>■ &gt; 65 dB signal-to-noise ratio</li> </ul>	DS1104 R&D Controller Board
<b>Analog Output</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 8 channels, 16 bit, 10 <math>\mu</math>s max. settling time</li> <li>■ <math>\pm 10</math> V output voltage range</li> </ul>	■ DS1104
<b>Incremental Encoder Interface</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Two digital inputs, TTL or RS422</li> <li>■ 24-bit digital incremental encoders</li> <li>■ Max. 1.65 MHz input frequency, i.e. fourfold pulse counts up to 6.6 MHz</li> <li>■ 5 V / 0.5 A sensor supply voltage</li> </ul>	Connector Panel
<b>Digital I/O</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 20-bit digital I/O (bit-selectable direction)</li> <li>■ <math>\pm 5</math> mA output current</li> </ul>	■ CP1104
<b>Serial Interface</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Serial UART (RS232, RS485 and RS422)</li> </ul>	Combined Connector/LED Panel
<b>Slave DSP Subsystem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Texas Instruments' DSP TMS320F240</li> <li>■ 4 kWord of dual-port RAM</li> <li>■ Three-phase PWM outputs plus 4 single PWM outputs</li> <li>■ 14 bits of digital I/O (TTL)</li> </ul>	■ CLP1104
<b>Physical Characteristics</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Power supply 5 V, 2.5 A / -12 V, 0.2 A / 12 V, 0.3 A</li> <li>■ Requires one 32-bit PCI slot</li> </ul>	

<sup>\*)</sup>Speed and timing specifications describe the capabilities of the hardware components and circuits of our products. Depending on the software complexity, the attainable overall performance figures can deviate significantly from the hardware specifications.



ข.2 ข้อมูลคุณลักษณะของ Pulse Width Modulation Control Circuit (TL494)



## SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

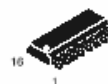
The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout

Order this document by TL494/D

# TL494

**SWITCHMODE  
PULSE WIDTH MODULATION  
CONTROL CIRCUIT**  
  
SEMICONDUCTOR  
TECHNICAL DATA



**D SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751B  
(SO-16)**



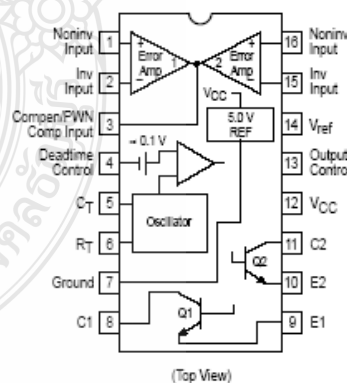
**N SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 648**

**MAXIMUM RATINGS** (Full operating ambient temperature range applies, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	42		V
Collector Output Voltage	V <sub>C1</sub> , V <sub>C2</sub>	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I <sub>C1</sub> , I <sub>C2</sub>	500		mA
Amplifier Input Voltage Range	V <sub>IR</sub>	-0.3 to +42		V
Power Dissipation @ T <sub>A</sub> ≤ 45°C	P <sub>D</sub>	1000		mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	R <sub>θJA</sub>	80		°C/W
Operating Junction Temperature	T <sub>J</sub>	125		°C
Storage Temperature Range	T <sub>stg</sub>	-55 to +125		°C
Operating Ambient Temperature Range TL494C TL494I	T <sub>A</sub>	0 to +70 -25 to +85		°C
Derating Ambient Temperature	T <sub>A</sub>	45		°C

NOTE: 1. Maximum thermal limits must be observed.

### PIN CONNECTIONS



### ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
TL494CD	T <sub>A</sub> = 0° to +70°C	SO-16
TL494CN		Plastic
TL494IN	T <sub>A</sub> = -25° to +85°C	Plastic



## TL494

## RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	$V_{CC}$	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	$V_{C1}, V_{C2}$	–	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	$I_{C1}, I_{C2}$	–	–	200	mA
Amplified Input Voltage	$V_{in}$	–0.3	–	$V_{CC} - 2.0$	V
Current Into Feedback Terminal	$I_{fb}$	–	–	0.3	mA
Reference Output Current	$I_{ref}$	–	–	10	mA
Timing Resistor	$R_T$	1.8	30	500	k $\Omega$
Timing Capacitor	$C_T$	0.0047	0.001	10	$\mu$ F
Oscillator Frequency	$f_{osc}$	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = 15$  V,  $C_T = 0.01$   $\mu$ F,  $R_T = 12$  k $\Omega$ , unless otherwise noted.)

For typical values  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , for min/max values  $T_A$  is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>REFERENCE SECTION</b>					
Reference Voltage ( $I_O = 1.0$ mA)	$V_{ref}$	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ( $V_{CC} = 7.0$ V to 40 V)	$Re_{line}$	–	2.0	25	mV
Load Regulation ( $I_O = 1.0$ mA to 10 mA)	$Re_{load}$	–	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current ( $V_{ref} = 0$ V)	$I_{SC}$	15	35	75	mA
<b>OUTPUT SECTION</b>					
Collector Off-State Current ( $V_{CC} = 40$ V, $V_{CE} = 40$ V)	$I_{C(off)}$	–	2.0	100	$\mu$ A
Emitter Off-State Current $V_{CC} = 40$ V, $V_C = 40$ V, $V_E = 0$ V)	$I_{E(off)}$	–	–	–100	$\mu$ A
Collector-Emitter Saturation Voltage (Note 2) Common-Emitter ( $V_E = 0$ V, $I_C = 200$ mA) Emitter-Follower ( $V_C = 15$ V, $I_E = -200$ mA)	$V_{sat(C)}$ $V_{sat(E)}$	– –	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current Low State ( $V_{OC} \leq 0.4$ V) High State ( $V_{OC} = V_{ref}$ )	$I_{OCL}$ $I_{OCH}$	– –	10 0.2	– 3.5	$\mu$ A mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	$t_r$	– –	100 100	200 200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	$t_f$	– –	25 40	100 100	ns

NOTE: 2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

## TL494

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ ,  $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ , unless otherwise noted.)

For typical values  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , for min/max values  $T_A$  is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

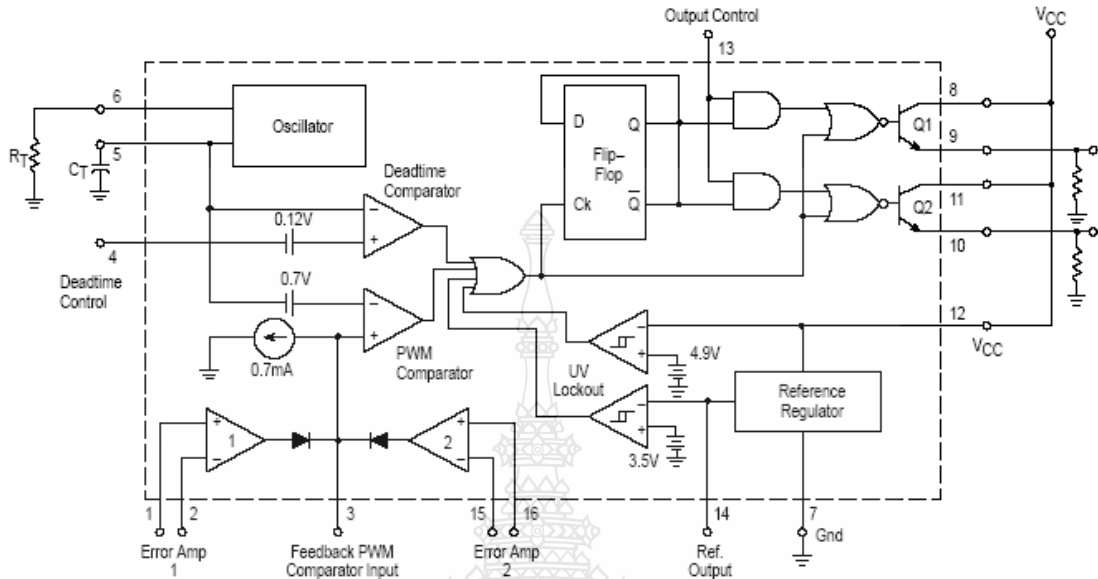
Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>ERROR AMPLIFIER SECTION</b>					
Input Offset Voltage ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$V_{IO}$	–	2.0	10	mV
Input Offset Current ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$I_{IO}$	–	5.0	250	nA
Input Bias Current ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$I_{IB}$	–	–0.1	–1.0	$\mu\text{A}$
Input Common Mode Voltage Range ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$V_{ICR}$	–0.3 to $V_{CC}$ –2.0			V
Open Loop Voltage Gain ( $\Delta V_O = 3.0\text{ V}$ , $V_O = 0.5\text{ V}$ to $3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$A_{VOL}$	70	95	–	dB
Unity–Gain Crossover Frequency ( $V_O = 0.5\text{ V}$ to $3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$f_{C-}$	–	350	–	kHz
Phase Margin at Unity–Gain ( $V_O = 0.5\text{ V}$ to $3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$\phi_m$	–	65	–	deg.
Common Mode Rejection Ratio ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ )	CMRR	65	90	–	dB
Power Supply Rejection Ratio ( $\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$ , $V_O = 2.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	PSRR	–	100	–	dB
Output Sink Current ( $V_O$ (Pin 3) = 0.7 V)	$I_{O-}$	0.3	0.7	–	mA
Output Source Current ( $V_O$ (Pin 3) = 3.5 V)	$I_{O+}$	2.0	–4.0	–	mA
<b>PWM COMPARATOR SECTION</b> (Test Circuit Figure 11)					
Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	$V_{TH}$	–	2.5	4.5	V
Input Sink Current ( $V_{Pin 3} = 0.7\text{ V}$ )	$I_{L-}$	0.3	0.7	–	mA
<b>DEADTIME CONTROL SECTION</b> (Test Circuit Figure 11)					
Input Bias Current (Pin 4) ( $V_{Pin 4} = 0\text{ V}$ to $5.25\text{ V}$ )	$I_{IB}$ (DT)	–	–2.0	–10	$\mu\text{A}$
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push–Pull Mode ( $V_{Pin 4} = 0\text{ V}$ , $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ ) ( $V_{Pin 4} = 0\text{ V}$ , $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$DC_{max}$	45 –	48 45	50 50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	$V_{th}$	– 0	2.8 –	3.3 –	V
<b>OSCILLATOR SECTION</b>					
Frequency ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$f_{osc}$	–	40	–	kHz
Standard Deviation of Frequency* ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$\sigma_{f_{osc}}$	–	3.0	–	%
Frequency Change with Voltage ( $V_{CC} = 7.0\text{ V}$ to $40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$\Delta f_{osc} (\Delta V)$	–	0.1	–	%
Frequency Change with Temperature ( $\Delta T_A = T_{low}$ to $T_{high}$ ) ( $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ )	$\Delta f_{osc} (\Delta T)$	–	–	12	%
<b>UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION</b>					
Turn–On Threshold ( $V_{CC}$ increasing, $I_{ref} = 1.0\ \text{mA}$ )	$V_{th}$	5.5	6.43	7.0	V
<b>TOTAL DEVICE</b>					
Standby Supply Current (Pin 6 at $V_{ref}$ , All other inputs and outputs open) ( $V_{CC} = 15\text{ V}$ ) ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ )	$I_{CC}$	– –	5.5 7.0	10 15	mA
Average Supply Current ( $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ , $V_{Pin 4} = 2.0\text{ V}$ ) ( $V_{CC} = 15\text{ V}$ ) (See Figure 12)		–	7.0	–	mA

\* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula,  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

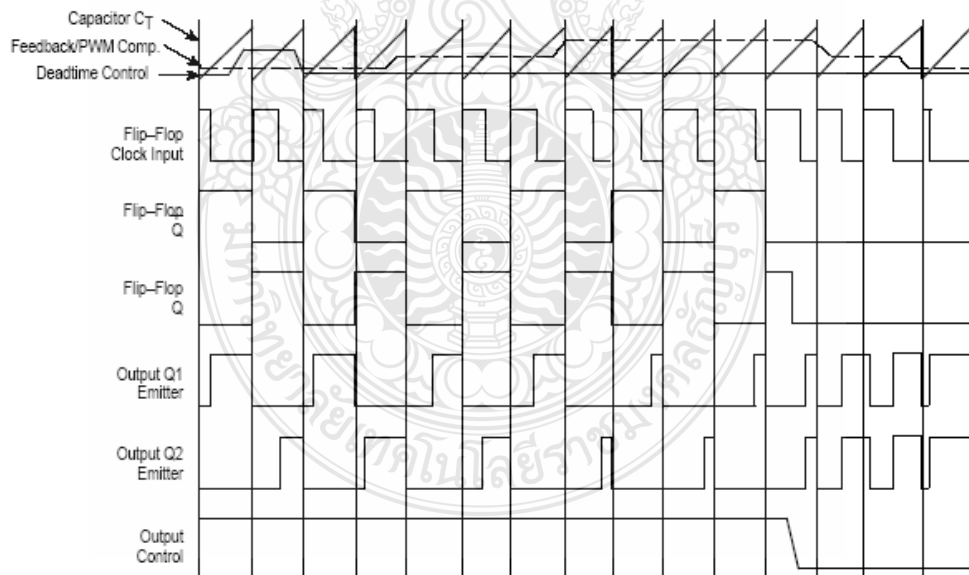
### TL494

Figure 1. Representative Block Diagram



This device contains 46 active transistors.

Figure 2. Timing Diagram



## TL494

### APPLICATIONS INFORMATION

#### Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components,  $R_T$  and  $C_T$ . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 3.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor  $C_T$  to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the Timing Diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the deadtime control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The deadtime control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output deadtime to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional deadtime may be imposed on the output by setting the deadtime-control input to a fixed voltage, ranging between 0 V to 3.3 V.

Functional Table

Input/Output Controls	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}} =$
Grounded	Single-ended PWM @ Q1 and Q2	1.0
@ $V_{ref}$	Push-pull Operation	0.5

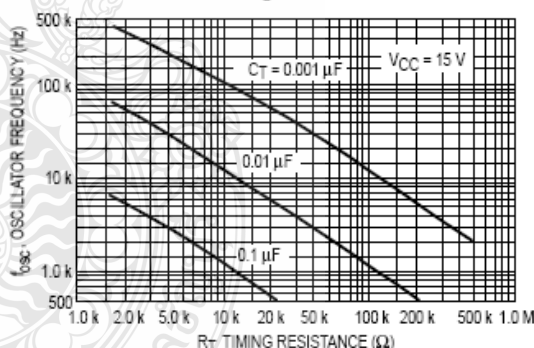
The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a common mode input range from -0.3 V to ( $V_{CC} - 2V$ ), and

may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor  $C_T$  is discharged, a positive pulse is generated on the output of the deadtime comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5.0 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of  $\pm 5.0\%$  with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0° to 70°C.

Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance



TL494

Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

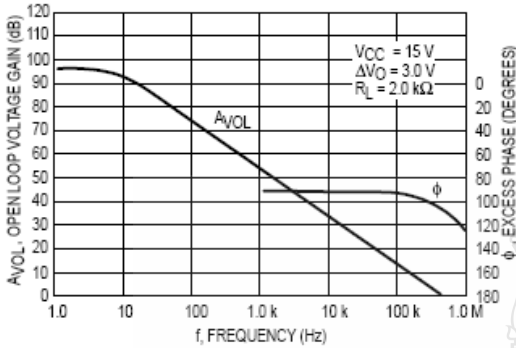


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

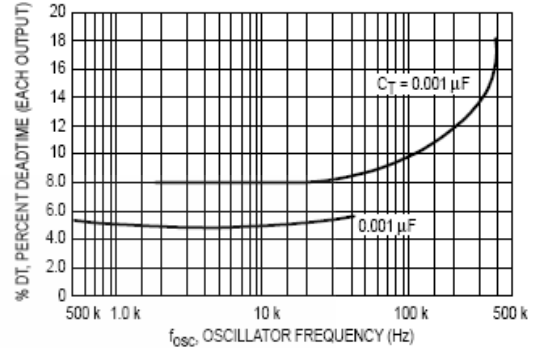


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

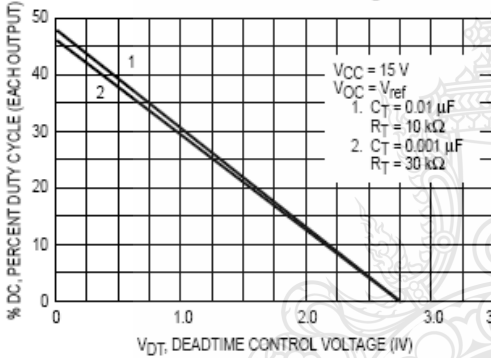


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

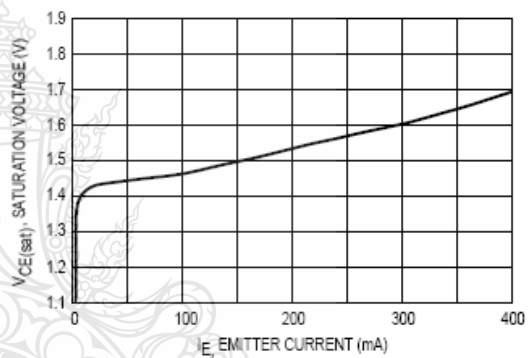


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

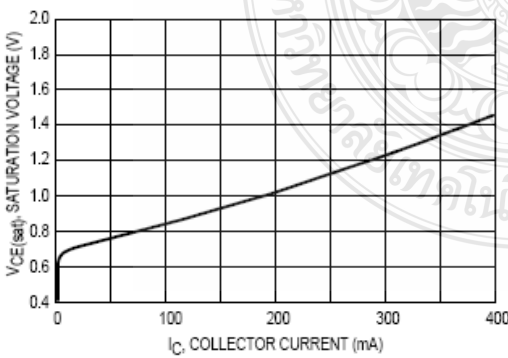
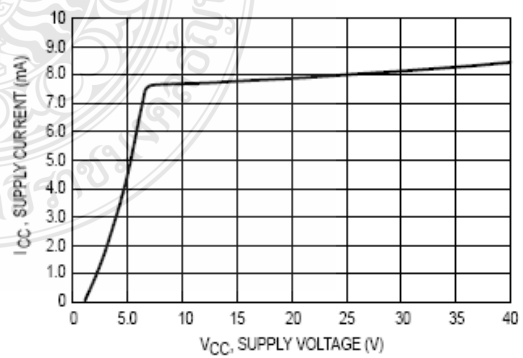


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage



TL494

Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

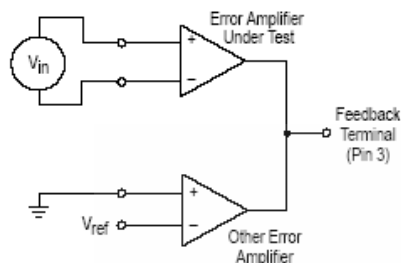


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

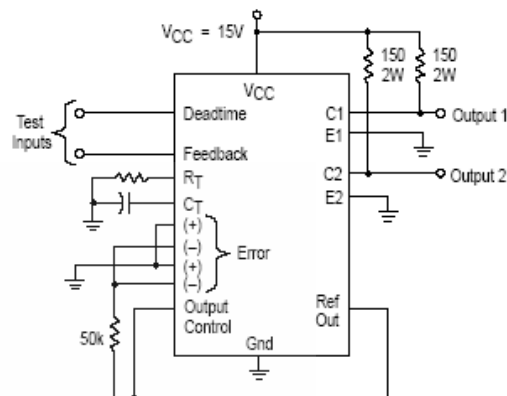


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

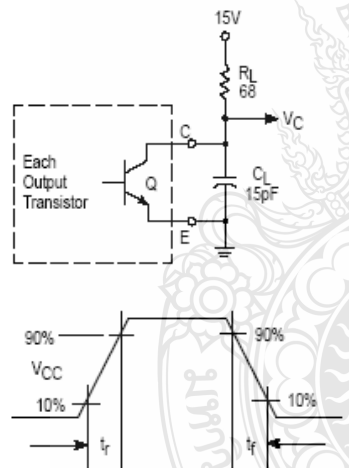
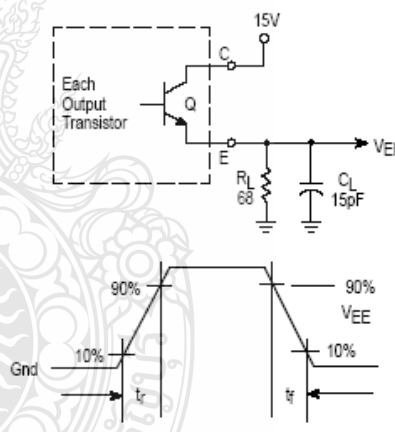


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform



TL494

Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

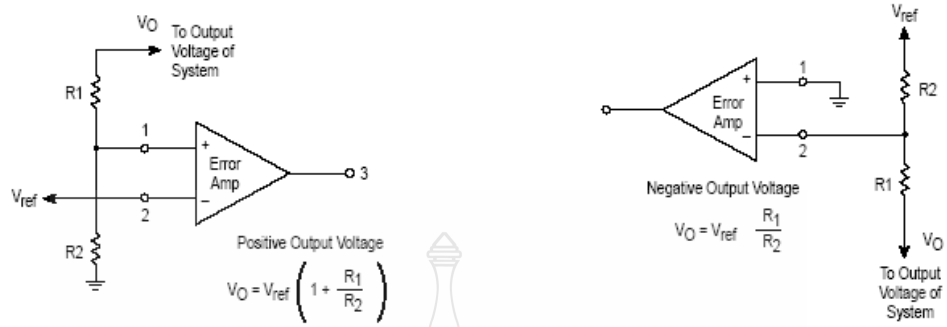


Figure 15. Deadtime Control Circuit

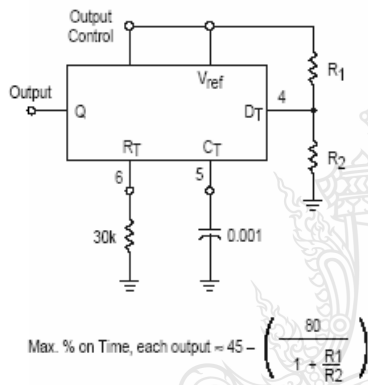


Figure 16. Soft-Start Circuit

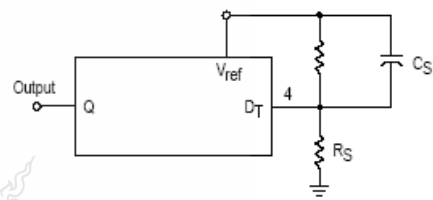
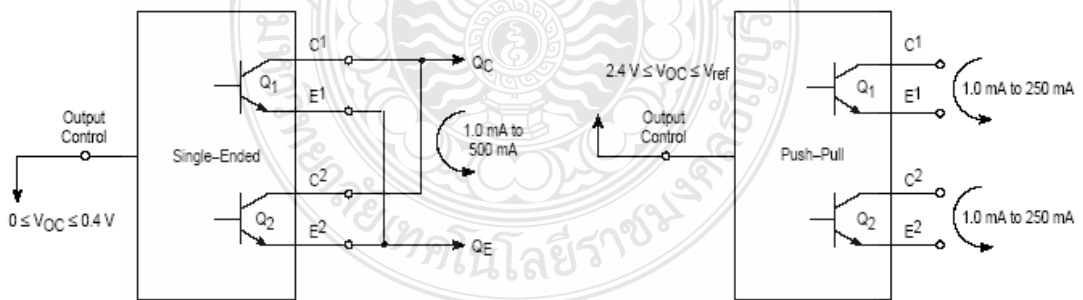


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations



TL494

Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

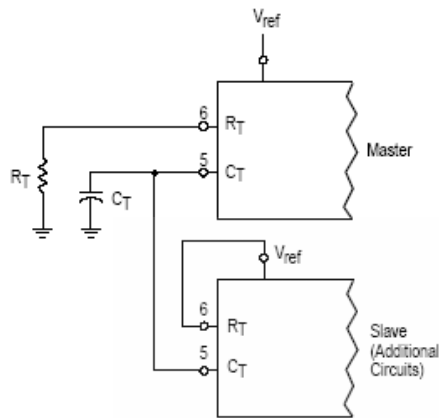


Figure 19. Operation with  $V_{in} > 40\text{ V}$  Using External Zener

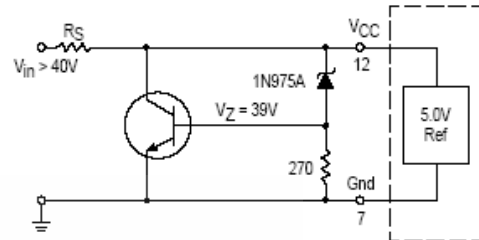
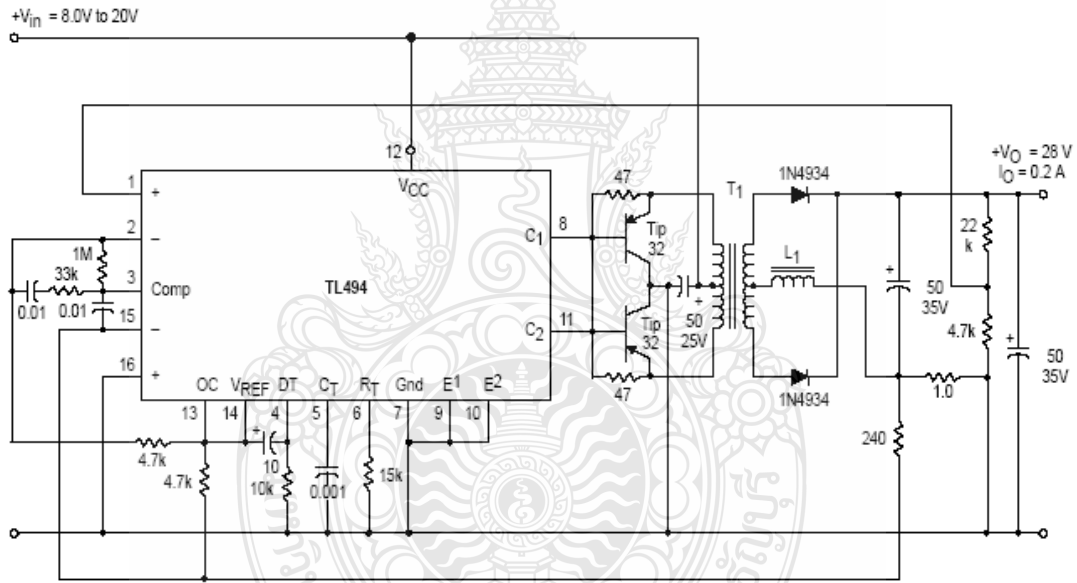


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter



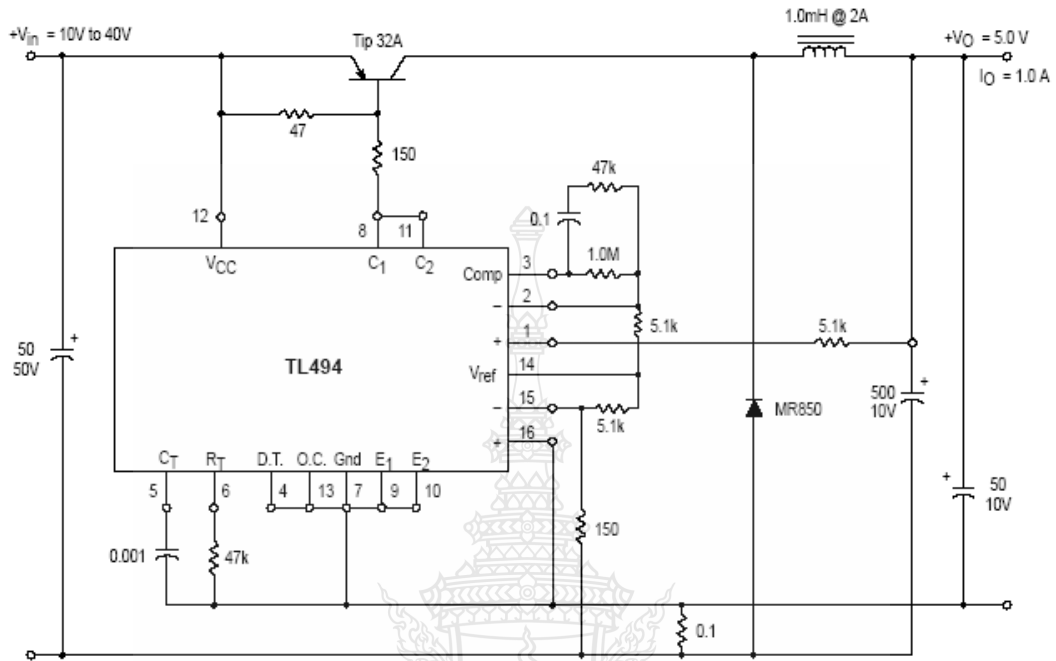
Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to }40\text{ V}$	14 mV 0.26%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ mA to }1.0\text{ A}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28\text{ V}, R_L = 0.1\ \Omega$	1.6 A
Efficiency	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	71%

L1 - 3.5 mH @ 0.3 A  
 T1 - Primary: 20T C.T. #28 AWG  
 Secondary: 120T C.T. #36 AWG  
 Core: Ferroxcube 1408P-L00-3CB



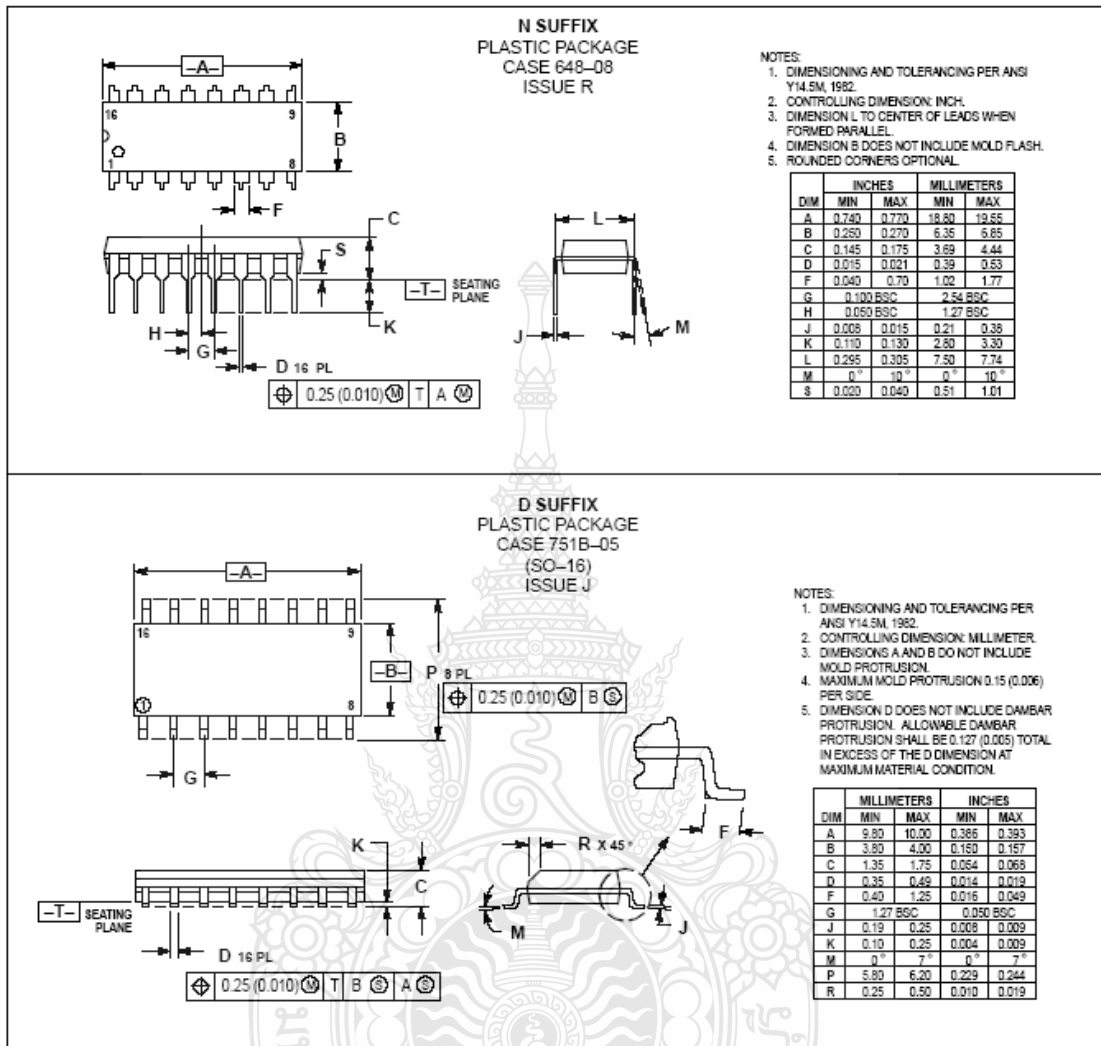
## TL494

Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter



Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	72%

### TL494 OUTLINE DIMENSIONS



### ข.3 ข้อมูลคุณลักษณะของอุปกรณ์ตรวจจ่ายกระแส LEM LA 55-P

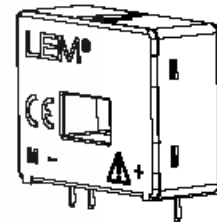


## Current Transducer LA 55-P/SP1

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



16024

 $I_{PN} = 50 \text{ A}$ 


### Electrical data

$I_{PN}$	Primary nominal current rms	50	A
$I_{PM}$	Primary current, measuring range	0 .. $\pm 100$	A
$R_M$	Measuring resistance	$T_A = 70^\circ\text{C}$   $T_A = 85^\circ\text{C}$	
		$R_{M \min}$   $R_{M \max}$   $R_{M \min}$   $R_{M \max}$	
	with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}$ max	0   215   0   210 $\Omega$
		@ $\pm 100 \text{ A}$ max	0   35   0   30 $\Omega$
	with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}$ max	0   335   30   330 $\Omega$
		@ $\pm 100 \text{ A}$ max	0   95   30   90 $\Omega$
$I_{SN}$	Secondary nominal current rms	25	mA
$K_N$	Conversion ratio	1 : 2000	
$V_C$	Supply voltage ( $\pm 5 \%$ )	$\pm 12 \dots 15$	V
$I_C$	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$ ) + $I_S$	mA

### Accuracy - Dynamic performance data

$X$	Accuracy @ $I_{PN}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15 \text{ V}$ ( $\pm 5 \%$ )	$\pm 0.65$	%
		@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ ( $\pm 5 \%$ )	$\pm 0.90$	%
$\epsilon_L$	Linearity error		$< 0.15$	%
$I_O$	Offset current @ $I_P = 0$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ   Max	mA
$I_{OM}$	Magnetic offset current <sup>1)</sup> @ $I_P = 0$ and specified $R_M$ after an overload of $3 \times I_{PN}$		$\pm 0.15$	mA
$I_{OT}$	Temperature variation of $I_O$	$-25^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	$\pm 0.05$	$\pm 0.30$ mA
		$-40^\circ\text{C} \dots -25^\circ\text{C}$	$\pm 0.10$	$\pm 0.50$ mA
$t_{10}$	Reaction time to 10 % of $I_{PN}$ step		$< 500$	ns
$t_r$	Response time <sup>2)</sup> to 90 % of $I_{PN}$ step		$< 1$	$\mu\text{s}$
di/dt	di/dt accurately followed		$> 200$	A/ $\mu\text{s}$
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)		DC .. 200	kHz

### General data

$T_A$	Ambient operating temperature	-40 .. +85	$^\circ\text{C}$
$T_S$	Ambient storage temperature	-40 .. +90	$^\circ\text{C}$
$R_S$	Secondary coil resistance	@ $T_A = 70^\circ\text{C}$	145 $\Omega$
		@ $T_A = 85^\circ\text{C}$	150 $\Omega$
$m$	Mass	18	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Notes: <sup>1)</sup> Result of the coercive field of the magnetic circuit

<sup>2)</sup> With a di/dt of 100 A/ $\mu\text{s}$ .

### Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

### Special features

- $I_{PM} = 0 \dots \pm 100 \text{ A}$
- $K_N = 1 : 2000$ .

### Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

### Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

### Application domain

- Industrial.



## Current Transducer LA 55-P/SP1

### Isolation characteristics

$V_d$	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	2.5	kV
$\hat{V}_w$	Impulse withstand voltage 1.2/50 $\mu$ s	4.5	kV
		Min	
dCp	Creepage distance	3.8	mm
dCI	Clearance distance	3.8	mm
CTI	Comparative Tracking Index (group IIIa)	175	

### Applications examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
dCp, dCI, $\hat{V}_w$	Rated isolation voltage	Nominal voltage
Single isolation	300 V	300 V
Reinforced isolation	150 V	150 V

### Safety



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

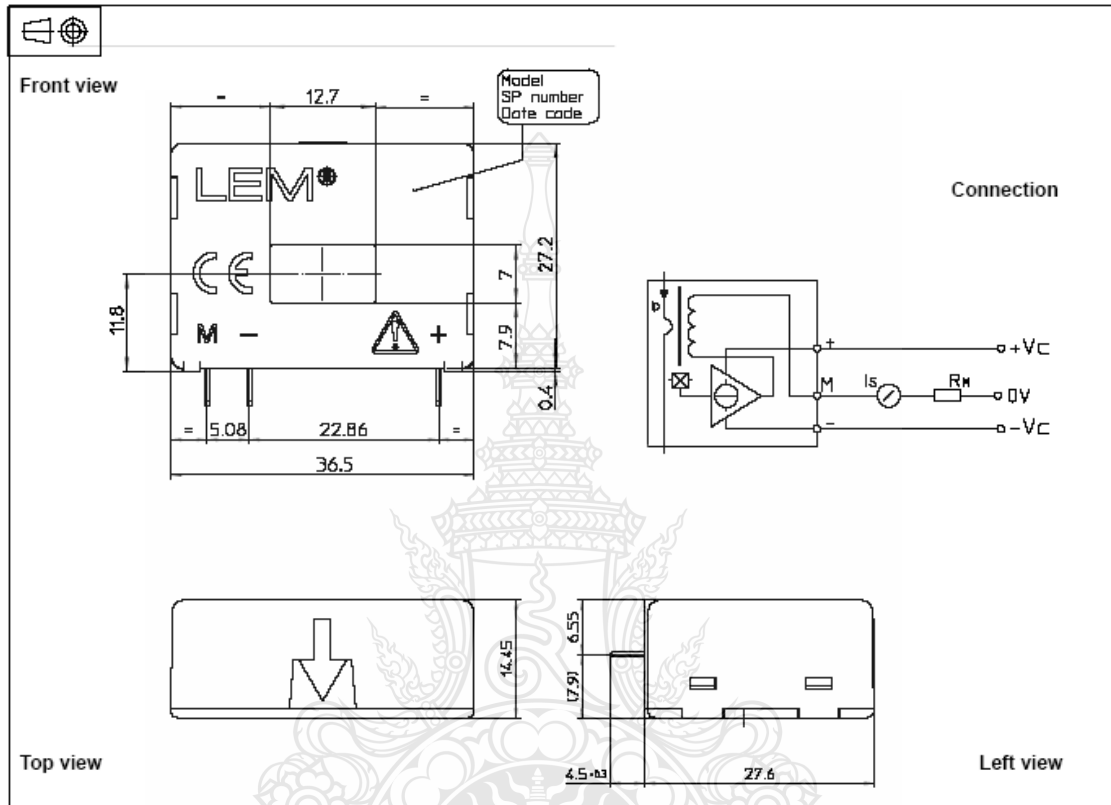
This transducer is a build-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

A protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.



### Dimensions LA 55-P/SP1 (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



#### Mechanical characteristics

- General tolerance
- Primary through-hole
- Fastening & connection of secondary
- Recommended PCB hole

± 0.2 mm  
 12.7 x 7 mm  
 3 pins  
 0.63 x 0.56 mm  
 0.9 mm

#### Remarks

- $I_s$  is positive when  $I_p$  flows in the direction of the arrow.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 90°C.
- Dynamic performances (di/dt and response time) are best with a single bar completely filling the primary hole.
- In order to achieve the best magnetic coupling, the primary windings have to be wound over the top edge of the device.



ภาคผนวก ค

ข้อมูลคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex-MSX-60 และ SIEMENS-SM55

# MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules



The MSX-64 and -60 are among the most powerful of Solarex's Megamodule™ series, a product line which is the culmination of nearly three decades of extensive research in polycrystalline silicon photovoltaics. With over 3 amperes of current at peak power, these modules offer the most cost-effective package in the industry, and charge batteries efficiently in virtually any climate.

These modules may be used in single-module arrays or deployed in multiple-module arrays, wired in series/parallel combinations as required to meet current and voltage requirements. They are engineered under Solarex's IntegraSystem™ system integration concept, which ensures full compatibility with other Solarex subsystems and components (support hardware, regulators, etc.) and easy system assembly. As single-module arrays, they may be mounted on a variety of surfaces using optional kits or by means of user-fabricated support hardware. Solarex also offers hardware for supporting multiple-module arrays.

These modules are well-suited for virtually all applications where photovoltaics are a feasible energy source, including telecommunications systems, pumping and irrigation, cathodic protection, remote villages and clinics, and aids to navigation.

## Individually Tested, Labeled and Warranted

As part of the final inspection procedure, every MSX module is tested in a solar simulator and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point ( $P_{max}$ )—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions. Furthermore, the MSX-64 and -60 are covered by our industry-leading limited warranty, which guarantees:

- that no module will generate less than its guaranteed minimum  $P_{max}$  when purchased;
- at least 80% of the guaranteed minimum  $P_{max}$  for twenty years.

Contact Solarex's Marketing Department for full terms and limitations of this unparalleled warranty.

## Reliable and Versatile

The Megamodule series has proved its reliability at thousands of installations in every climate on Earth. Among the features that contribute to its versatility:

### Dual Voltage Capability

These modules consist of 36 polycrystalline silicon solar cells electrically configured as two series strings of 18 cells each. The strings terminate in the junction box on the module back. Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration in the field by moving leads in the junction box. This design also allows instal-

lation of bypass diodes on 18-cell strings, which can improve reliability and performance in systems with nominal voltage 24V and above.

### High-Capacity Multifunction Junction Box

The size of the junction box (25 cubic inches, 411cc) and its six-terminal connection block allow most system array connections to be made right in the J-box. The box also can accommodate bypass or blocking diodes or a small regulator, which can save the expense and labor of additional boxes. The box is raintight (IP54 rated) and accepts 1/2" nominal or PG13.5 conduit or cable fittings. The standard terminals accept wire as large as AWG #10 (6mm<sup>2</sup>); an optional terminal block accepts wire up to AWG #4 (25mm<sup>2</sup>).

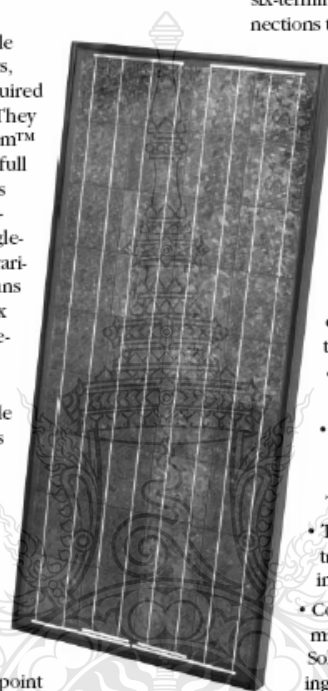
### Proven Materials and Construction

Megamodule materials reflect Solarex's quarter-century of experience with solar modules and systems installed in virtually every climate on Earth.

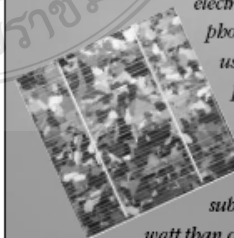
- Polycrystalline silicon solar cells: efficient, attractive, stable.
- Modules are rugged and weatherproof: cell strings are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and tempered glass with a durable Tedlar backsheet.
- Tempered glass superstrate is highly light-transmissive (low iron content), stable, and impact-resistant.
- Corrosion-resistant, bronze-anodized extruded aluminum frame is strong, attractive, compatible with Solarex mounting hardware and most other mounting structures.

### Options

- Blocking and bypass diodes
- Solarstate™ charge regulator
- Protective aluminum backplate



*More than 20 years ago, Solarex made the first polycrystalline silicon solar cell, advancing photovoltaics beyond the first-generation monocrystalline technology developed for electronics. Developed specifically for photovoltaics, polycrystalline silicon is used in Solarex's Mega™ series to provide a wide range of attractive, efficient modules. They require substantially less energy to manufacture and generate substantially more energy per rated watt than other crystalline silicon modules.*



**Safety Approved**

MSX-60 and -64 modules are listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Group C & D hazardous locations.



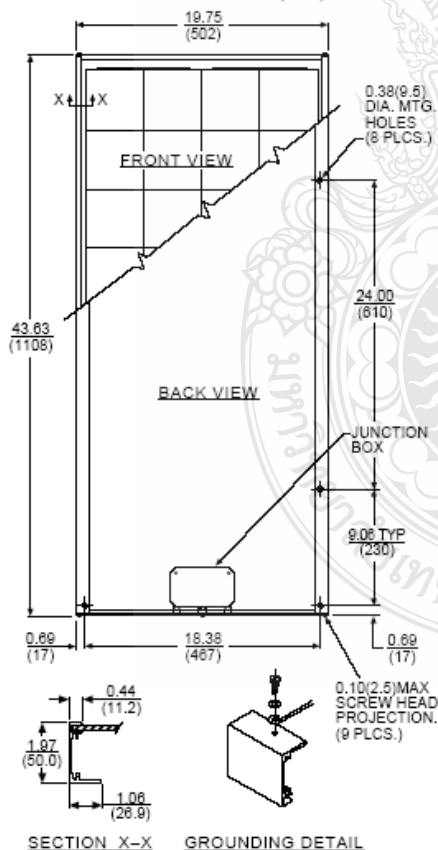
**Quality Certified**

These modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories to demanding specifications, and comply with IEC 1215, IEEE 1262 and CEC 503 test requirements, including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of one-inch (25mm) hail at terminal velocity;
- 2700 VDC frame/cell string isolation test;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- simulated wind loading of 125 mph (200 kph).

**Mechanical Characteristics**

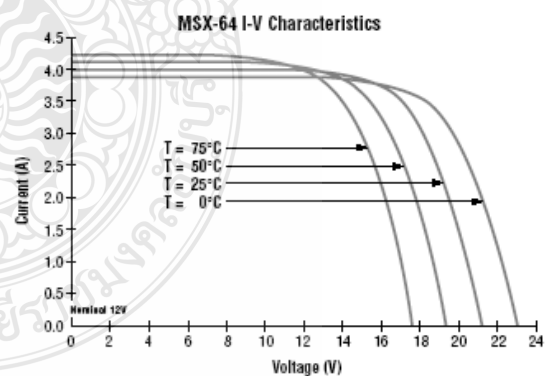
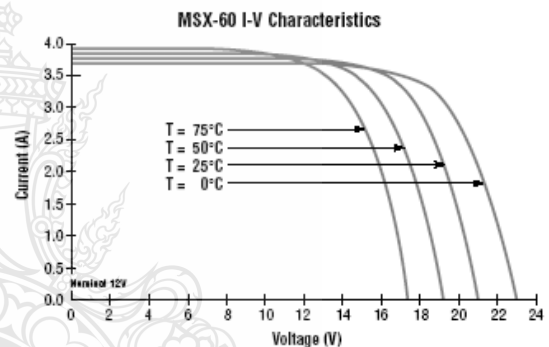
**Weight:** 15.9 pounds (7.2 kg)  
**Dimensions:** Dimensions in brackets are in millimeters  
 Unbracketed dimensions are in inches  
 Overall tolerances ±1/8" (3mm)



**Typical Electrical Characteristics<sup>1</sup>**

	MSX-64	MSX-60
Maximum power (P <sub>max</sub> )	64W	60W
Voltage @ P <sub>max</sub> (V <sub>mp</sub> )	17.5V	17.1V
Current @ P <sub>max</sub> (I <sub>mp</sub> )	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum P <sub>max</sub>	62W	58W
Short-circuit current (I <sub>sc</sub> )	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	.....-(80±10)mV/°C.....	
Temperature coefficient of short-circuit current	.....(0.065±0.015)%/°C...	
Temperature coefficient of power NOCT <sup>2</sup>	.....-(0.5±0.05)%/°C..... ..... 47±2°C.....	

**NOTES:**  
 (1) These modules are tested, labeled and shipped in 12V configuration. These data represent the performance of typical 12V modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made in a solar simulator at Standard Test Conditions (STC), which are:  
 • illumination of 1 kW/m<sup>2</sup> (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5;  
 • cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).  
 Operating characteristics in sunlight may differ slightly. To determine the characteristics of modules in 6V configuration, divide the 12V voltage characteristics by 2 and multiply current characteristics by 2. Power values are unchanged.  
 (2) Under most climatic conditions, the cells in a module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under standard operating conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m<sup>2</sup>, and wind speed of 1 m/s.



- [Download MSX-60 I-V XLS](#)
- [Download MSX-64 I-V XLS](#)
- [Download CAD](#)



### VARIABLES AFFECTING PERFORMANCE

The performance of typical MEGA SX-64 and -60 modules is described by the I-V curves and electrical characteristics table on the next page. Each module's actual, tested output characteristics are printed on its label.

The current and power output of photovoltaic modules are approximately proportional to illumination intensity. At a given intensity, a module's output current and operating voltage are determined by the characteristics of the load. If that load is a battery, the battery's internal impedance will dictate the module's operating voltage. An I-V curve is simply all of a module's possible operating points (voltage/current combinations) at a given cell temperature and light intensity. Increases in cell temperature increase current but decrease voltage.

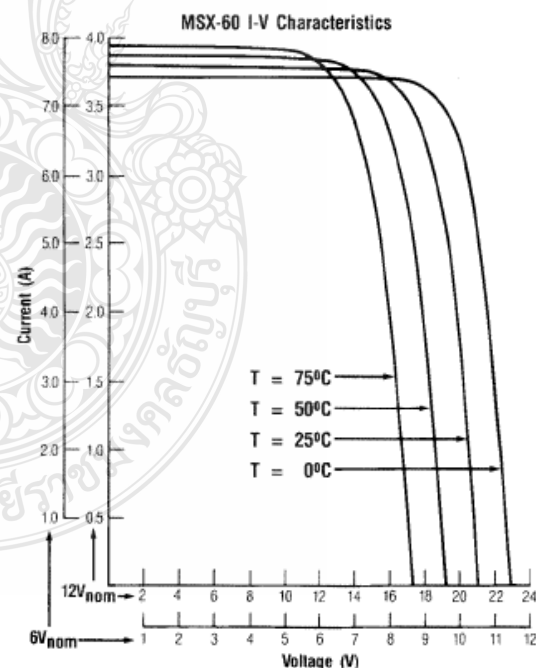
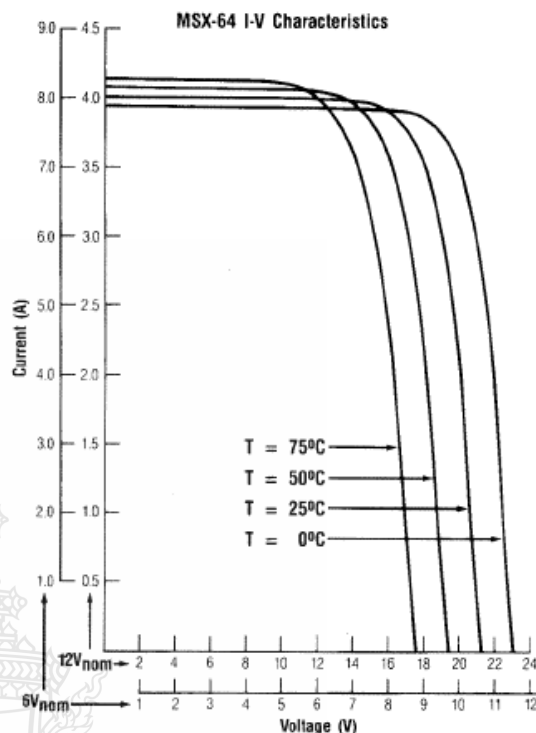
### TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS<sup>(1)</sup>

	12 VOLT CONFIGURATION <sup>(2)</sup>	
	MSX-64	MSX-60
Typical peak power (P <sub>p</sub> )	64W	60W
Voltage @ peak power (V <sub>pp</sub> )	17.5V	17.1V
Current @ peak power (I <sub>pp</sub> )	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum peak power	62W	58W
Short-circuit current (I <sub>sc</sub> )	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	..... -(80±10)mV/°C .....	
Temperature coefficient of short-circuit current	.... (0.065±0.015)%/°C .....	
Approximate effect of temperature on power	..... -(0.5±0.05)%/°C .....	
NOCT <sup>(3)</sup>	..... 49°C .....	

**Notes:**

- (1) These data represent the performance of typical modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made at Standard Test Conditions (STC), which are:
  - Illumination of 1 kW/m<sup>2</sup> (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5
  - Cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).
- (2) Electrical characteristics of modules wired in the nominal 6V configuration may be found by using the 6V scales on the I-V curves. For more exact values, divide the 12V voltage characteristics in the table by 2 and multiply the 12V current characteristics by 2. Power values are unchanged.
- (3) Under nearly all climatic conditions, the solar cells in an operating module are hotter than the ambient temperature, a fact which must be considered when reading module data. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indication of this temperature rise, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m<sup>2</sup>, and average wind speed of 1 m/s.

### I-V CHARACTERISTICS

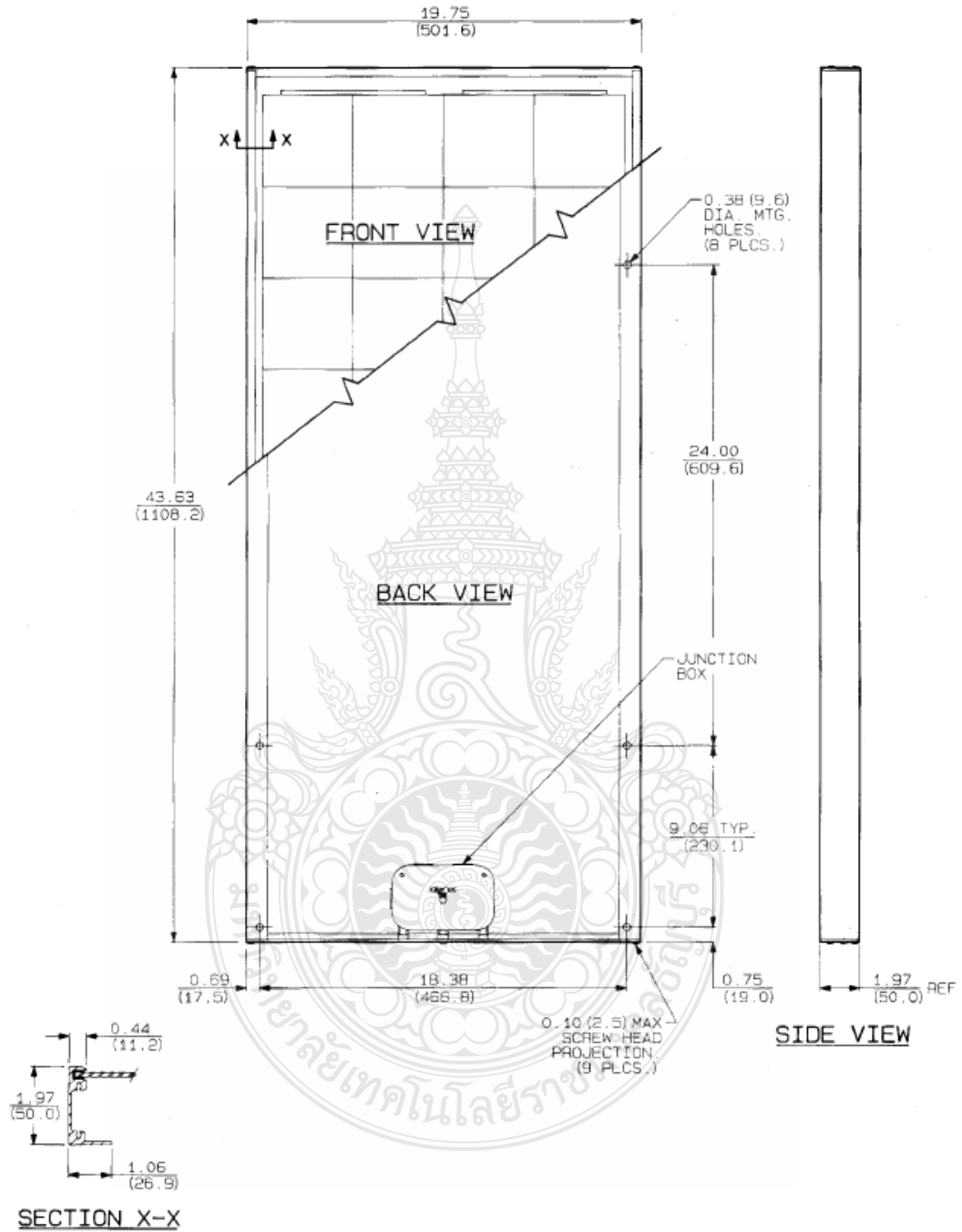


**MECHANICAL CHARACTERISTICS**

MEGA SX-64 and -60 are mechanically identical, differing only in electrical output.

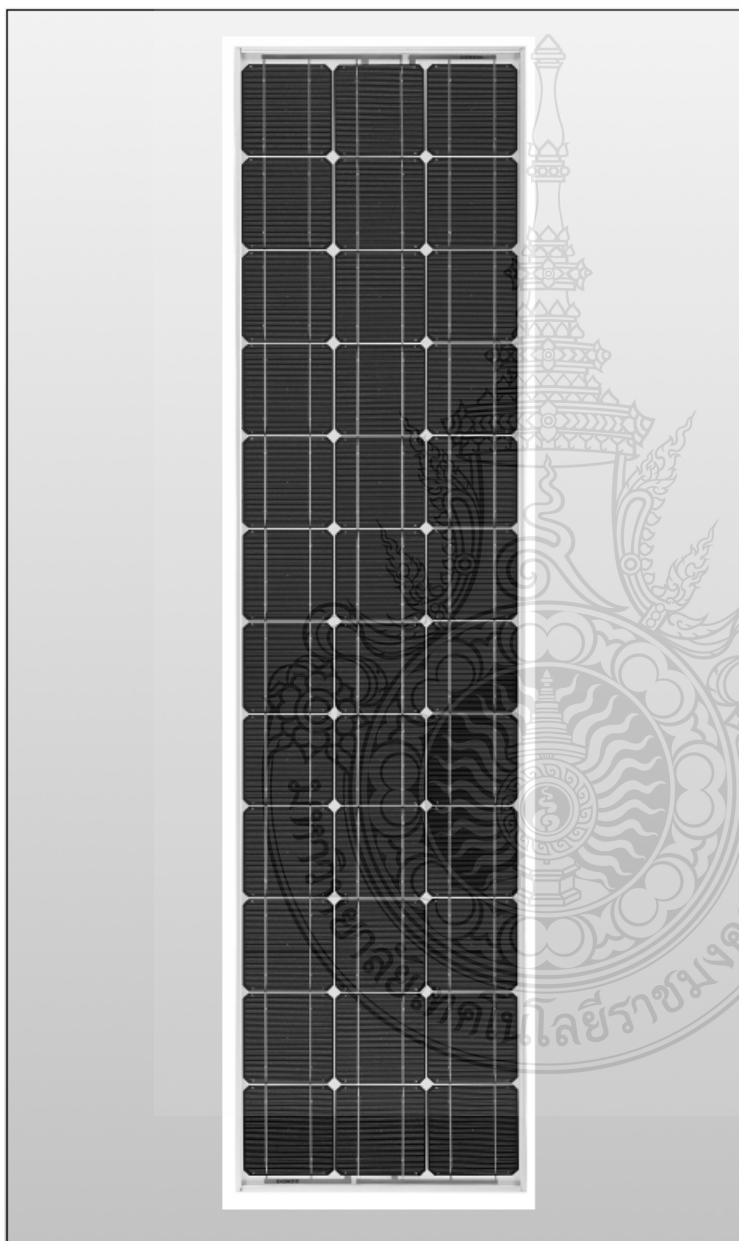
**Weight:** 15.9 pounds (7.2 kg)

**Dimensions:** Dimensions in brackets are in millimeters  
Unbracketed dimensions are in inches



# SIEMENS

## Solar module SM55



When it comes to reliable and environmentally-friendly generation of electricity from sunlight, solar modules from Siemens provide the perfect solution. Manufactured in compliance with the most stringent quality standards, Siemens Solar modules are designed to withstand the toughest environmental conditions and are characterized by their long service life. Siemens Solar modules are covered by a 25-year limited warranty on power output – your guarantee of trouble-free solar power generation.

### PowerMax® technology

Siemens' proprietary PowerMax® technology optimizes the energy production of individual cells and solar modules for all types of environmental conditions. PowerMax® process optimization includes a special refining technique for ingots, a clean room semiconductor grade production process, and a multistage proprietary TOPS™ (Texture Optimized Pyramidal Surface) process. The TOPS process incorporates the formation of textured pyramids on the surface of the solar cell. These pyramids are then specially treated to passivate the surface which optimizes the cell's optical properties for maximum absorption of photons from the sun's light. TOPS also maximizes photon absorption from direct and diffused light (typical under cloudy conditions). This means that light absorption is especially high, even at low light levels. Siemens PowerMax® solar cells deliver maximum energy throughout the day.

### Solar module

Model:	<b>SM55</b>
Rated power:	<b>55 Watts</b>
Limited Warranty:	<b>25 Years</b>

### Certifications and Qualifications

- UL-Listing 1703
- TÜV safety class II
- JPL Specification No. 5101-161
- IEC 61215
- MIL Standard 810
- CE mark
- FM Certification (SM55-J)

### Intelligent module design

- All cells are electrically matched to assure the greatest power output possible.
- Ultra-clear tempered glass provides excellent light transmission and protects from wind, hail, and impact.
- Torsion and corrosion resistant anodized aluminum module frame ensures dependable performance, even through harsh weather conditions and in marine environments.
- Built-in bypass diodes (12V configuration) help system performance during partial shading.

### High quality

- Every module is subject to final factory review, inspection and testing to assure compliance with electrical, mechanical and visual criteria.
- 36 PowerMax® single-crystalline solar cells deliver excellent performance even in reduced-light or poor weather conditions.
- Cell surfaces are treated with the Texture Optimized Pyramidal Surface (TOPS™) process to generate more energy from available light.
- Fault tolerant multi-redundant contacts on front and back of each cell provide superior reliability.
- Solar cells are laminated between a multi-layered polymer backsheet and layers of ethylene vinyl acetate (EVA) for environmental protection, moisture resistance, and electrical isolation.
- Durable back sheet provides the module underside with protection from scratching, cuts, breakage, and most environmental conditions.
- Laboratory tested and certified for a wide range of operating conditions.
- Ground continuity of less than 1 ohm for all metallic surfaces.
- Manufactured in ISO 9001 certified facilities to exacting Siemens quality standards.

### Easy installation

- Standard ProCharger™-S terminal enclosures are designed for trouble-free field wiring and environmental protection. (Modified versions also available, e.g., as SM55-J with the special ProCharger™-CR junction boxes.)
- Lightweight aluminum frame and pre-drilled mounting holes for easy installation.
- Modules may be wired together in series or parallel to attain required power levels.

### Performance warranty

- 25 Year limited warranty on power output.

Further information on solar products, systems, principles and applications is available in the Siemens Solar product catalog.

Siemens modules are recyclable.

Siemens Solar GmbH  
A joint venture of  
Siemens AG and Bayernwerk AG  
Postfach 46 07 05  
D-80915 München  
Germany

### Solar module SM55

Electrical parameters		
Maximum power rating $P_{max}$ [Wp] <sup>1)</sup>		55
Rated current $I_{MPP}$ [A]		3.15
Rated voltage $V_{MPP}$ [V]		17.4
Short circuit current $I_{SC}$ [A]		3.45
Open circuit voltage $V_{OC}$ [V]		21.7
Thermal parameters		
NOCT <sup>2)</sup> [°C]		45 ±2
Temp. coefficient: short-circuit current		1.2mA / °C
Temp. coefficient: open-circuit voltage		-0.77V / °C
Qualification test parameters <sup>4)</sup>		
Temperature cycling range [°C]		-40 to +85
Humidity freeze, Damp heat [%RH]		85
Maximum permitted system voltage [V]		600 (1000 V per ISFRA)
Wind Loading PSF [N/m <sup>2</sup> ]		50 [2400]
Maximum distortion <sup>3)</sup> [°]		1.2
Hailstone impact Inches [mm]		1.0 [25]
	MPH [m/s]	52 [v=23]
Weight Pounds [kg]		12 [5.5]

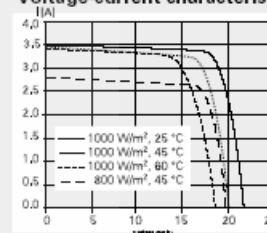
- 1) Wp (Watt peak) = Peak power (Minimum Wp = 50 Watts)

Air Mass AM = 1.5  
Irradiance E = 1000 W/m<sup>2</sup>  
Cell temperature T<sub>c</sub> = 25 °C

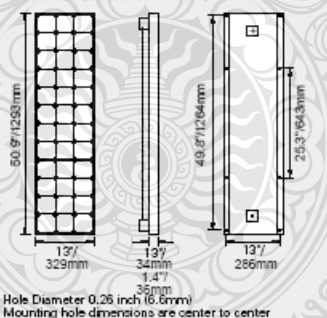
- 2) Normal Operating Cell Temperature at:  
Irradiance E = 800 W/m<sup>2</sup>  
Ambient temperature T<sub>U</sub> = 20 °C  
Wind Speed v<sub>w</sub> = 1 m/s

- 3) Diagonal lifting of module plane
- 4) Per IEC 61215 test requirements

### Voltage-current characteristic

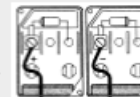


### Module dimensions



### ProCharger™-S Junction-box

Maximum cable diameter: 4mm<sup>2</sup>  
Type of protection: IP44



Your address for photovoltaics from Siemens Solar



© Siemens Solar 1998 Status 11/98 - Subject to modification.

Siemens Solar Industries  
P.O.Box 6032  
Camarillo, CA 93011, U.S.A.  
Web site: www.siemenssolarpv.com  
E-mail: sunpower@solarpv.com  
Tel: 805-482-6800  
Fax: 805-388-6395

Siemens Showa Solar Pte. Ltd.  
166 Kallang Way  
Singapore 349248  
Tel: 65-842-3886  
Fax 65-842-3887

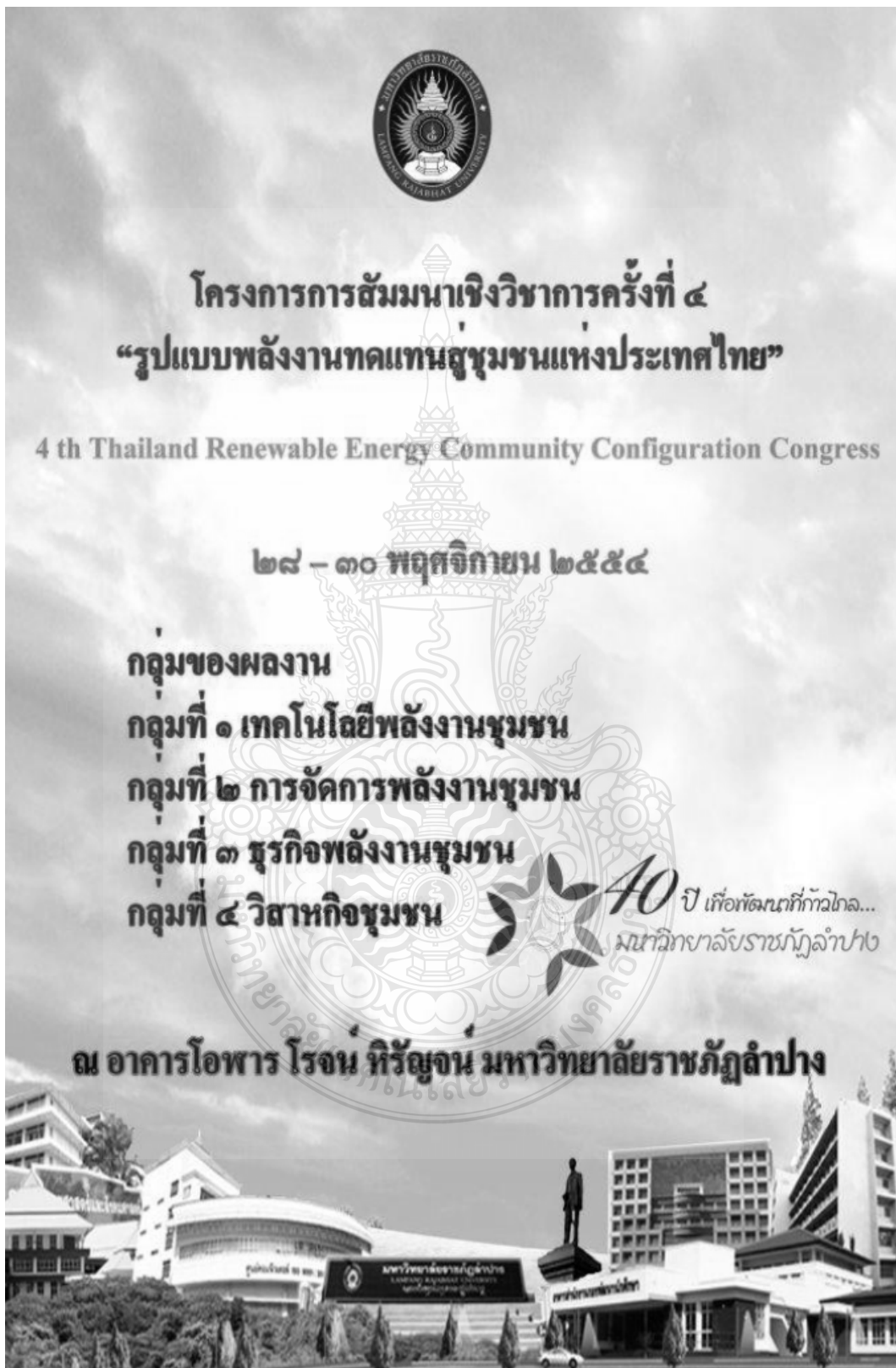
Order No. 019896, Rev. C



ภาคผนวก ง  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



### ง.1 Real-time Simulation with MATLAB/Simulink Photovoltaic Module



**รายชื่อผู้พิจารณาบทความ**  
**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ ๔**  
**“รูปแบบพลังงานทดแทนของชุมชนแห่งประเทศไทย” ประจำปี ๒๕๕๔**

<u>ชื่อ</u>	<u>นามสกุล</u>	<u>มหาวิทยาลัย/สถาบัน</u>
ศ.ดร. ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร. วัฒนพงศ์	รักษ์วีเชียร	มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร. ศิริชัย	เทพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. นริส	ประทีนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. ศุภวิทย์	ลวณะสกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร. สมชาย	มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. ศิรินุช	จินดารักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. นิพนธ์	เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. ทิเกะ	บุญนาถ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร. นุภาพ	แย้มไทรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร. บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. วีรชัย	โรยรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร. อธิตพล	ศศิธรานุวัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
รศ.ดร. วิลาศ	พุ่มพิมล	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. อภิรักษ์	ชัยเสนา	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. หฤทัย	ไทยสุชาติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. นงลักษณ์	สายเทพ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. สิริพิศ	พิชชานวม	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร. จันทนา	กฤษรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. ย้ำพล	อวารณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. วิทยา	พวงสมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร. วเรศ	วีระสัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร. กิตติศักดิ์	สมุทรธารักษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. ประจักษ์	อัครพัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร. บุญล้ำ	สุนทร	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ดร. วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ผ่องศรี	ศิวราศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. สโรชา	เจริญวัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. สถาพร	ทองวิค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**รายชื่อผู้พิจารณาบทความ**  
**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ ๔**  
**“รูปแบบพลังงานทดแทนของชุมชนแห่งประเทศไทย” ประจำปี ๒๕๕๔**

<u>ชื่อ</u>	<u>นามสกุล</u>	<u>มหาวิทยาลัย/สถาบัน</u>
ดร. จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. ณรงค์ชัย	โอเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. กฤษณ์ชนม์	ภูมิภคิตพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. สุขุมมาลัย	เนียมกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. รัฐภูมิ	พรหมณะ	มหาวิทยาลัยพะเยา
Ph.D. Larry	Kreiser	Cleveland State University.
รศ.ดร. มนต์รี	พิริยะกุล	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร. บัณฑิต	ผั่งนรินทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
รศ.ดร. บุญทวรรณ	วิงวอน	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
รศ.ดร. อวารณ์	โสภาสพัฒนกิจ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
รศ.ดร. ถวิล	นิลใบ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. พรชนก	ทองลาด	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ. กาญจนา	คума	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ. สุวรรณิ	โพธิศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. เกร็อวัลย์	วงศ์เพบูลย์	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. ไพฑูรย์	อินตะขัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. ธนกร	น้อยทองเล็ก	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. ปองปรารถน์	สุนทรเกษข	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง



## สารบัญ

บทความ	หน้า
<b>Oral Presentation Session</b>	
<b>กลุ่มที่ 1 เทคโนโลยีพลังงานชุมชน (ET)</b>	
ET001 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ที่ห้วยคำปี บ้านด่านห้วยใต้ ตำบลแม่พลู อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ทวีศักดิ์ วรรณจักร์ อนุชา ริกการณ และ คณะร่วมวิจัย.....	1
ET003 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การออกแบบชุดระบายความร้อนใต้ผิวดินสำหรับ ระบบไฮโดรโปนิกส์ จิราพร ตั้งใจ สหทัยา ทองสา ศรายุทธ วัลย์วุฒิ สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์.....	11
ET004 การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับลดอุณหภูมิ ก๊าซชีววมวล ศศิธร เลิศมณีพงศ์ สหทัยา ทองสา สุษฎดี สุขใจ สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์.....	19
ET005 การศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแท่งเชื้อเพลิงจากขยะ RDF-5 ผสมกลีเซอริน ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลภายใต้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ธนสิทธิ์ แก้วธนาศวรรย์ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์.....	27
ET006 แผลงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลา เดชนิตธีร อัมปรีดา วันชัย ทรัพย์สิงห์.....	37
ET007 การประมาณระยะเวลาตายประจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้ในระบบ พลังงานทดแทนแบบผสมผสาน อภิวัฒน์ อัครเมฆิน บุญยง ปลั่งกลาง.....	45
ET008 การหาตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจำหน่ายด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของ กลุ่มอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด วีระชัย พ่วงพรพิทักษ์ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์.....	53
ET009 การวิเคราะห์และออกแบบคอนเวอร์เตอร์อัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบผลิต กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ วีระชาติ ชัดมัน วันชัย ทรัพย์สิงห์.....	61
ET011 การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการประยุกต์ใช้น้ำมันไพโรไลซิสในกิจกรรม เพาะเห็ด บ้านปางยางดก จังหวัดลำปาง ปฐมพงศ์ ยะพะง่า วุฒิกกร กาวารี นวัตกรรม กิจไพศาลสกุล รวีภา ยงประยูร.....	67

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4  
28 - 30 พฤศจิกายน 2554 มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ET006

## แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลา Real-time Simulation with MATLAB/Simulink Photovoltaic Module

เดชนิตติธ อิมปริดา<sup>1</sup> วันชัย ทรัพย์สิงห์

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-89796-4375 E-Mail: datnititorn\_tit@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานนำเสนอ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรของไดโอด, ตัวต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำไปพัฒนาวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) เพื่อนำไปประยุกต์เชื่อมต่อกับวงจรแหล่งจ่ายจริงด้วยการ์ดอินเตอร์เฟสต่อไปเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองระบบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางพาณิชย์ ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย ซึ่งจากการทดสอบแบบจำลองพบว่าค่าความต้านทานอนุกรมและขนานมีผลต่อค่า Fill Factor, ตัวแปรไดโอดและอุณหภูมิทำงานของเซลล์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ และความเข้มแสงส่งผลต่อกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ความเข้มแสง, อุณหภูมิ, การ์ดอินเตอร์เฟส, รูปแบบทันเวลา

### 1. บทนำ

พลังงานส่วนใหญ่นำมาใช้ในปัจจุบันเช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินมีแนวโน้มราคาที่สูงมากขึ้น อีกทั้งยังก่อมลพิษต่อสภาวะแวดล้อม พลังงานทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ไม่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น พลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในประเทศไทยเนื่องด้วยพื้นที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้เรียกว่า โซลาร์เซลล์ (Solar cell) [4] สร้างขึ้นจากการนำสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมาผ่านขบวนการเพื่อให้เป็นสารชนิดพี (P-type) และชนิดเอ็น (N-type) รอยต่อระหว่างชั้นทั้งสองเรียกว่า พีเอ็นจังก์ชัน (PN Junction) ซึ่งเป็นส่วนที่สร้างกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 0.5-0.8V ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน โดยทั่วไปจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์เพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่เหมาะสมจากนั้นนำมาต่อขนานกันจะได้กระแสเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่าพิกัดแรงดันและกระแสที่เหมาะสมในการประจุแบตเตอรี่ เรียกว่า โมดูล (PV Module)

ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อเสียตรงที่ใช้ต้นทุนการผลิตและต้นทุนในการติดตั้งค่อนข้างสูง ในการทดลองนั้นมักจะมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์และอุณหภูมิที่มากน้อยต่างกันไปในแต่ละวันส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกันด้วย ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้ สามารถที่จะใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถจ่ายโหลดได้จริง หากนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล ก็จะเกิดความสะดวกโดยที่สามารถทดลองในช่วงเวลาใดก็ได้

2. ทฤษฎี

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photo current) เกิดจากแสงสว่างไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อ PN Junction ซึ่งจะเขียนแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแส ในสมการที่(1) แสดงถึงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (exponential equation)

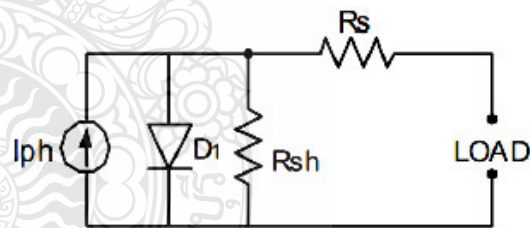
$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{NKT} \right) - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \tag{1}$$

- เมื่อ  $I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง ; A
- $I_s$  คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด ; A
- Q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C
- N คือ Ideal factor
- K คือ ค่าคงที่ของ Boltzmanมีค่าเท่ากับ  $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/Kevin
- T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ ;Kevin
- V คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด ; V
- $R_s$  คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ;  $\Omega$
- $R_{sh}$  คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ;  $\Omega$

ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ตามตารางที่ 1 และจากสมการที่ (1) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่า Ideal factor [2]

Technology	N	Technology	N
Si-mono	1.2	a-Si:H triple	5
Si-poly	1.3	CdTe	1.5
a-Si:H	1.8	CIS	1.5
a-Si:H tandem	3.3	AsGa	1.3



รูปที่ 1 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่1 จะเห็นว่ามี 5 ตัวแปรที่มีผลต่อกระแสและแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ  $I_s$  , N เป็นผลของไดโอด ,ค่า  $I_{ph}$  เป็นผลของแสงที่ตกกระทบบน และค่า  $R_s$  ,  $R_{sh}$  เป็นค่าความต้านทานซึ่งถือเป็นการสูญเสียที่เซลล์แสงอาทิตย์

2.1.1 ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ค่า  $I_{ph}$  เป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ( radiation intensity ) และอุณหภูมิ ตามสมการที่ (2)

$$I_{ph} = \left[ I_{sc} + k_I (T - T_{ref}) \right] \lambda \tag{2}$$

- เมื่อ  $I_{sc}$  คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25 °C ; A
- $K_1$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร ; A/°C
- $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ ; Kelvin
- $\lambda$  คือ ความเข้มแสง ; kW/m<sup>2</sup>

**2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ**

หากกำหนดให้ความเข้มแสงมีค่าคงที่ จากสมการที่ (2) ค่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรสัมพันธ์อุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมียังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสอิมิตัวย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode ( $I_s$ ) ดังสมการที่ (3) [2]

$$I_s(T) = I_s \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^{-3} \exp \left[ \left( \frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N V_t} \right] \tag{3}$$

- เมื่อ  $E_g$  คือ Band gap energy of semiconductor
- $V_t$  คือ Thermal voltage at room temperature

**2.1.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)**

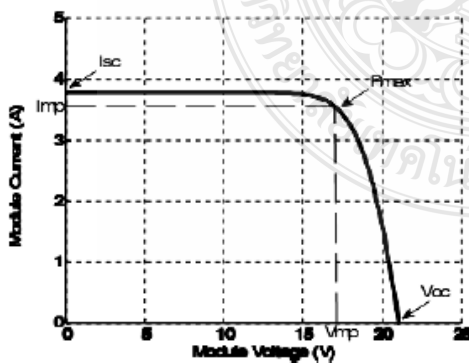
แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่คือ 12 V ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ (1) หากไม่คิดผลของ  $R_s$  และ  $R_{sh}$  จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (4) [3]

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left( \exp \frac{qV}{N K T n_s} - 1 \right) \tag{4}$$

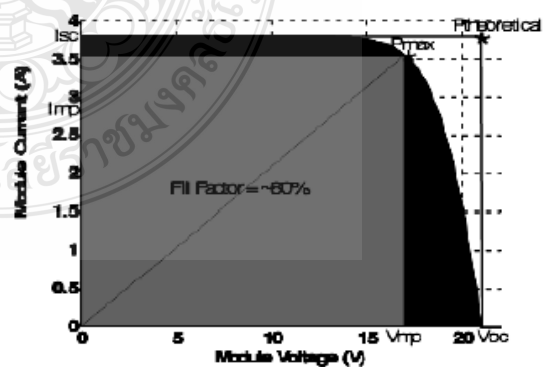
- เมื่อ  $n_p$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน และ  $n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

**2.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)**

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ I-V curve ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถสร้าง I-V curve ได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า Maximum Power Point (MPP หรือ  $P_{max}$ )



รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ [6]



รูปที่ 3 แสดงค่า Fill Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

ในการพิจารณาคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open circuit Voltage ; $V_{oc}$ ) , กระแสขณะลัดวงจร (Short circuit current ; $I_{sc}$ ) , กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point ;MPP ) , กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power current ; $I_{mp}$ ) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power Voltage ; $V_{mp}$ ) นอกจากนี้ยังมีค่าที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่

- อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจรเรียกว่า ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor ;FF) ดังรูปที่ 3 เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของโซลาร์เซลล์ สามารถเขียนเป็นสมการที่ 5

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \tag{5}$$

- ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ หาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ด้านเข้า ( $P_{in}$ )สามารถเขียนเป็นสมการที่ 6

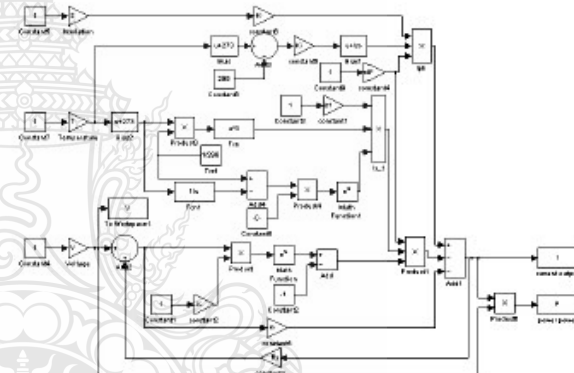
$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \tag{6}$$

### 3. การสร้างแบบจำลอง และส่วนประกอบของระบบ

ตารางที่ 2 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้า รุ่น MSX 60 [2]

**Solarex MSX 60 Specifications (1kW/m<sup>2</sup>, 25°C)**

Characteristics	SPEC.
Typical peak power ( $P_p$ )	60W
Voltage at peak power ( $V_{pp}$ )	17.1V
Current at peak power ( $I_{pp}$ )	3.5A
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	3.8A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	-73mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current (K)	3mA/°C
Approximate effect of temperature on power	-0.38W/°C
Nominal operating cell temperature (NOCT)	49°C



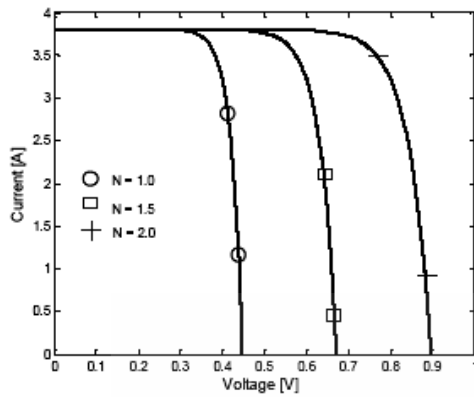
รูปที่ 4 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมMatlab/simulink

จากรูปที่ 4 เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโปรแกรม Matlab/Simulink โดยศึกษาผลกระทบของ 5 ตัวแปรต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) ต่อไป การจำลองได้ใช้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์Solarex รุ่น MSX 60 โดยใช้ค่า Open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) Short circuit current ( $I_{sc}$ ) , Temperature coefficient of Short circuit current ( $K$ ) ดังตารางที่ 2

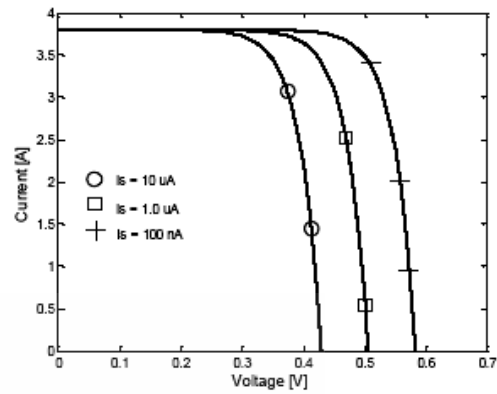
### 4. การจำลอง และผลการจำลองระบบ

#### 4.1 ผลของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)

ค่า N ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับการผลิตโครงสร้างของเซลล์โดยดูจากตารางที่ 1 ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า N เป็น 1.0 ,1.5 และ2.0 ได้ผลตามรูปที่ 5 ส่วนค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไปอัสกลับในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า  $I_r$  เป็น 100nA,1μAและ10μA ได้ผลตามรูปที่ 6



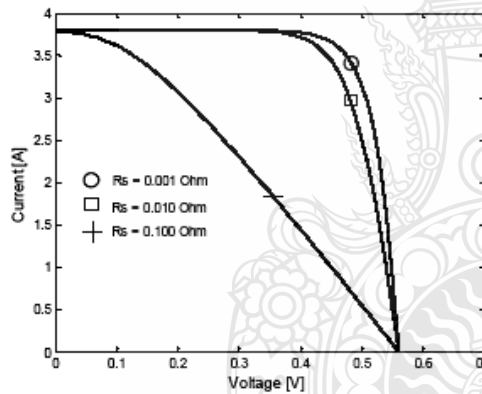
รูปที่ 5 ผลการจำลองผลกระทบของค่า N



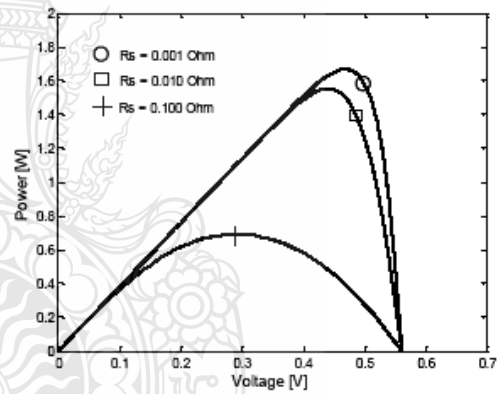
รูปที่ 6 ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $I_s$

**4.2 ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance)**

ค่า  $R_s$  เป็นความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นร่วมกับความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก [4] ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า  $R_s$  เป็น  $1m\Omega$ ,  $0.01\Omega$  และ  $0.1\Omega$  ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 7 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 8



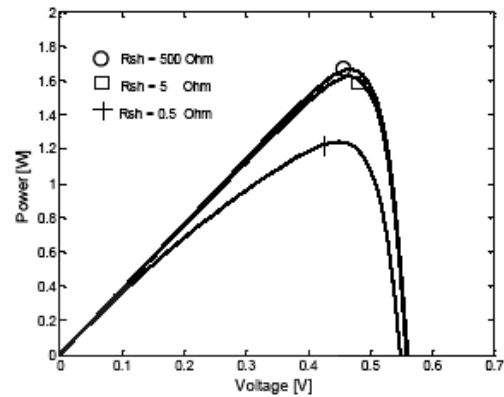
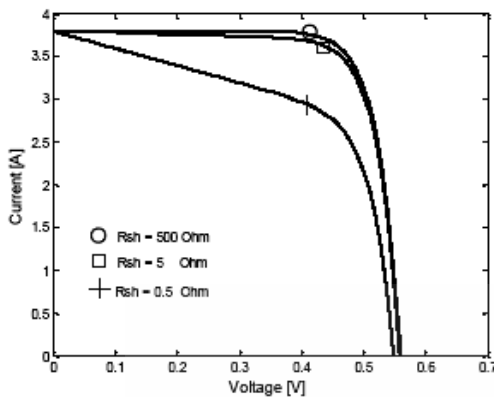
รูปที่ 7 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $R_s$



รูปที่ 8 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $R_s$

**4.3 ผลของความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)**

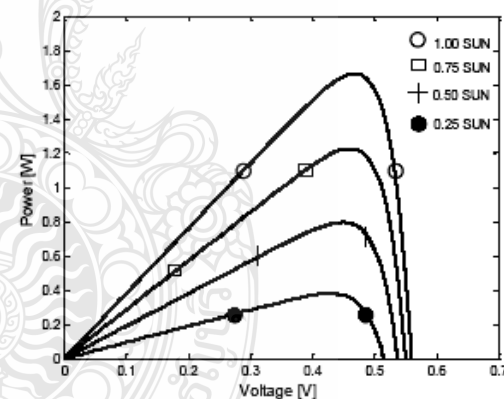
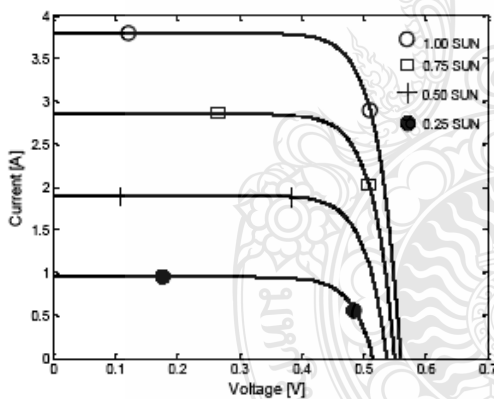
ค่า  $R_{sh}$  เป็นการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วนโดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ [4] ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า  $R_{sh}$  เป็น  $500\Omega$ ,  $5\Omega$  และ  $0.5\Omega$  ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 9 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 10



รูปที่ 9 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $R_{sh}$  รูปที่ 10 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบค่า  $R_{sh}$

**4.4 ผลของความเข้มแสง ( radiation intensity)**

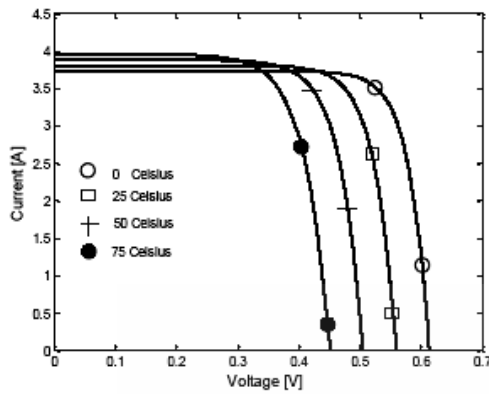
ความเข้มแสงเป็นตัวแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกระแสโฟโต้ที่เกิดขึ้นต่อแสงสว่างจะมีสัดส่วนที่เป็นเชิงเส้นกับแสงสว่างของดวงอาทิตย์ ในตารางที่ 2 กำหนด  $I_{sc}$  เป็น 3.8A ที่STC(ความเข้มแสง $1000W/m^2$  อุณหภูมิ  $25^{\circ}C$  , AM =1.5) ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสง  $\lambda$  เป็น 1.00sun, 0.75sun, 0.50sun และ 0.25sun (อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}C$ ) ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 11 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 12



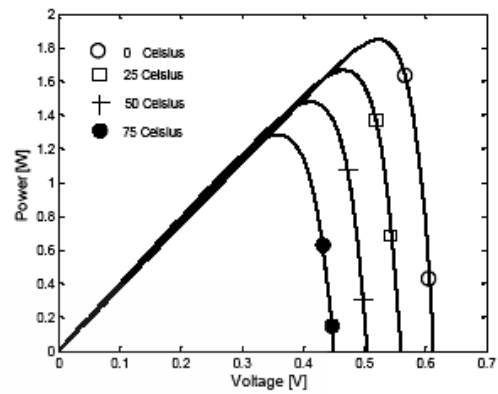
รูปที่ 11 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $\lambda$  รูปที่ 12 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $\lambda$

**4.5 ผลของอุณหภูมิ (Cell Temperature)**

อุณหภูมิของเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้เลือกตรอนที่รอยต่อ P-N มีพลังงานในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแต่ไม่มากนักในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า T เป็น  $0^{\circ}C$  , $25^{\circ}C$  , $50^{\circ}C$  และ  $75^{\circ}C$  (ความเข้มแสง  $1000 W/m^2$ ) ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 13 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 14



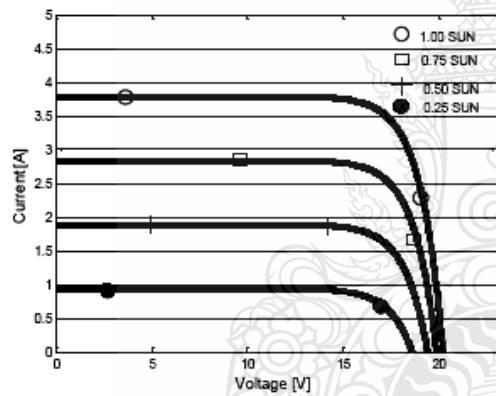
รูปที่ 13 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า T



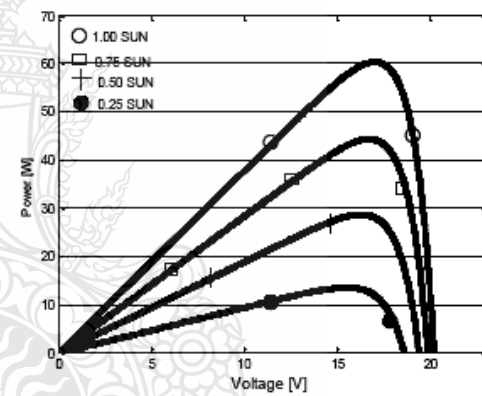
รูปที่ 14 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า T

4.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

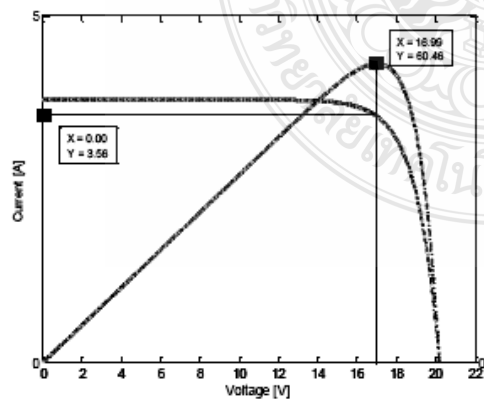
การเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมและสะดวกในการใช้งานทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานและอนุกรมกัน ในการจำลองได้นำเซลล์มาต่ออนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์ ( $N_s=36$ ) จำนวนทางขนาน 1 ทางขนาน ( $N_p=1$ ) ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 15 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 16



รูปที่ 15 กราฟ I-V Curve การจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 16 กราฟ P-V Curve การจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 17 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับคุณลักษณะ MSX60

	MSX-60	Simulation	Error
$P_{max}$ (W)	59.85	60.46	1.02%
$V_{mp}$ (V)	17.1	16.99	0.64%
$I_{mp}$ (A)	3.5	3.56	1.71%

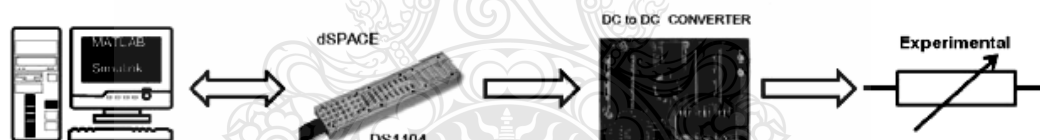


## 5. สรุป

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink version 7.1 พบว่าค่าผลของไดโอด( $N_1$ )มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกของโซลาร์เซลล์ ค่าความต้านทาน  $R_s$  ที่มากขึ้นมีผลต่อค่า Fill factor ที่ลดลง และค่าความต้านทาน  $R_{sh}$  ที่น้อยลงทำให้ค่า Fill factor ลดลงด้วยส่งผลให้เซลล์ทำงานได้ไม่ถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งค่า Fill factor ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับค่าความเข้มแสงจะเป็นตัวกำหนดกระแสขาออกของโซลาร์เซลล์ถ้าความเข้มแสงต่ำกระแสขาออกก็จะต่ำลงด้วย อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง ส่วนการนำเซลล์มาต่อเป็นโมดูล พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น MSX 60 ดังตารางที่ 3 ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองไปวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) ผ่านทางการ์ตูนเตอร์เฟสเพื่อจ่ายโหลดจริงชนิดตัวต้านทานต่อไป

## 6. แนวทางการวิจัยพัฒนา

จากการทดสอบแบบจำลอง PV Module พบว่านอกจากปัจจัยด้านราคาของระบบที่สูงแล้ว การขาดความรู้ความเข้าใจคุณลักษณะของ PV Module ก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้อัตราการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยยังต่ำเมื่อเทียบกับต่างประเทศ ดังนั้นในการพัฒนาต่อไปของบทความนี้จะนำเทคโนโลยีของ dSPACE DS1104 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลที่มีประสิทธิภาพสูงมาเชื่อมต่อกับแบบจำลองของ PV Module ที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้ Real-time Library (RTI1104) ซึ่งเป็น blocksets ที่ใช้หลักการของ DAC(Digital to Analog Converter) และ ADC (Analog to Digital Converter) เพื่อทำให้เป็นสัญญาณจริงในรูปแบบทันเวลา(Real-times) โดยสามารถปรับค่าตัวแปรสำหรับทดสอบที่มีผลต่อการจ่ายกำลังของ PV Module , โหลดข้อมูล ,สั่งเริ่มต้น ,ควบคุมขั้นตอนการทดสอบหรือหยุดทำงานและดูผลตอบสนองได้โดยใช้ Control Dest Software อีกทั้งยังสามารถเก็บรวบรวมผลการทดสอบได้อีกด้วย จากนั้นสัญญาณในเวลาดิจิตอลจาก dSPACE DS1104 จะถูกส่งผ่านไปยัง DC Converter ขนาด 60W เพื่อแปลงพิกัดกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น นำไปสู่การทดสอบและวิเคราะห์การจ่ายโหลดแบบเชิงเส้น สามารถหาค่า I-V Curve และ P-V Curve เพื่อพัฒนาระบบควบคุมของ PV Systems ต่อไป



รูปที่ 18 แสดงการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายจริงและโหลด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Francisco M. Gonzalez-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in Matlab" II CIBELEC,2005
- [2] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK" Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS, October 22-24, 2008, San Francisco, USA
- [3] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri "Matlab/simulink based of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification" INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Volume 1, Issue 3, 2010, pp. 487-500
- [4] บุญยั้ง ปลั่งกลาง "PHOTOVOLTAIC SYSTEMS" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [5] D. L. King, B. R. Hansen, J. A. Kratochvil, and M. A. Quintana "DARK CURRENT-VOLTAGE MEASUREMENTS ON PHOTOVOLTAIC MODULES AS A DIAGNOSTIC OR MANUFACTURING TOOL" , 26th PVSC; Sept. 30-Oct. 3, 1997; Anaheim, CA , pp 1125-1128

## 3.2 Real-time Photovoltaic Module using MATLAB/Simulink Interfacing

# *Electrical Engineering Network 2012*

of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



### CONFERENCE TOPICS

#### GROUP 1 (PE)

Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

#### GROUP 2 (PW)

Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

#### GROUP 3 (RE)

Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

#### GROUP 4 (TE)

Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

#### GROUP 5 (CP)

Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

#### GROUP 6 (GN)

Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.



*GRAND PARADISE HOTEL*  
*Nong Khai, THAILAND*  
*April 3-5, 2012*

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

รายชื่อผู้พิจารณาบทความการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

รศ. ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

รศ. ดร. วิจิตร กิมเรศ

รศ. ดร. มนต์รี ศิริปรัชญานันท์

รศ. ดร. เวทีน ปิยะรัตน์

รศ. ดร. เฉชา พวงดาวเรือง

รศ. ดร. วิบูลย์ ชื่นแจก

รศ. ดร. เสถียร ธัญญศรีรัตน์

ผศ. ดร. แนบบุญ หุนเจริญ

ผศ. ดร. อภินันท์ อูร์โสภณ

ผศ. ดร. วรวัฒน์ เสรียมวิบูล

ผศ. ดร. อาทิตย์ โสทรโยม

ผศ. ดร. เผด็จ เผ่าละออ

ผศ. ดร. กองพล อารีรักษ์

ดร. ยุทธนา จำสุวรรณ์

ดร. นิวัฒน์ อังควศิษฐพันธ์

รศ. ดร. โกศล โอฬารไพโรจน์

ดร. อุเทน คำนำน

นายณรงค์ นันทกุศล

ผศ. กฤษดา ยิ่งขยัน

นายเอกทัศน์ พฤษวรรณ

ดร. จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน

ผศ. ชาอุษัย เดชธรรมรงค์

ดร. จักรกฤษณ์ เหลือบ่วง

นายสมนึก เครือสอน

นายทัศนระ ถมทอง

นายณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์

ผศ. อภิศักดิ์ ชันแก้วหล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ผศ.สุรสิทธิ์ แสนทอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายเอกสิทธิ์ สุมณพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายปรีชา มหาไม้	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายก่อกเกียรติ อี้อคทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
รศ.ดร.ชัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.พินิจ ศรีธรร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ประเสริฐ เตือนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.พันธ์พงศ์ อภิชาตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.สุทธิพันธ์ ต้นโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ศิริชัย ลาภาสระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.วุฒิชัย สว่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายกิตติวุฒิ จินนະบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายรุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายเอกจิต สุ่มวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นางอุษา คงเมือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายชิตติสรรค์ วิจิโต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายบุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายวุฒิวัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายชูศักดิ์ กมลขันดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายวินัย เมธาวีทิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายประหยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายภัทรพงศ์ อัญชันภาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายสมพล โคศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายทัศนพันธ์ สุวรรณทัต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายจตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นัฐ โชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิติพันธ์ คุณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายชนนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายทอง ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายสมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศศ.พิชญ์ ดาราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายมนัส บุญเกียรติทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพนา คูสีดากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศศ.กิจจา ลักษณะอำนวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศศ.โกศล นิธิโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศศ.จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิลमित นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายเกรียงไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายวัฒน์ วัชวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายณัฐวัชรินทร์ ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศศ.ศรีศักดิ์ น้อยไธรมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
นางสาวพัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศศ.สรายุทธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศศ.วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศศ.เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศศ.กระจำจ พัทย์วงษ์วิฑิตยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ศรีสุตา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.นภัทร วัฒนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.สมพันธ์ อำพาวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ศศ.วิสุทธิ์ พงศ์พฤกษ์ชาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.เมธา พัทธคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ผศ.วิชัย ครอบกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายเอกวิทย์ หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระ ชันยาภิกษย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายรัก สกุลพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายนครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤษดา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายจงเจริญ คู่บุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤษฎา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายจิระพงศ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระชัย จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายเฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ผศ.ดร.ปรีชา สาครรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ดร.ภักต์วัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายไพบูลย์ เกียรติสุขคนธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
รศ.พันธ์ พิริยะวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ประวิช เปரியเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ประยงค์ เสาร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.จักรวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุระ ดันดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ณรงค์ สี่หาจ่อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วันชัย ทวีชัยสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ณัฐวุฒิ โสมเกษตรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภักดิ์พิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐภัทร	พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายสมชาย	เปียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพร้อมศักดิ์	อภิรดีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายนิติพงศ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัฐพล	หาอุปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศศ.จินตนา	นาคะสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศศ.ปราชญ์	ดาบบัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไพฑูรย์	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวิโรจน์	ไพراجเนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพงษ์ศักดิ์	อำภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายบุญยัง	นบนอบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายอภิรดา	นามแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุทินัน	พรอนุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วินัย	วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กิตติวัฒน์	นันทเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศศ.อิฐอรัญญา	ปีติมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัชชดิพงษ์	อุทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

RE10	การพัฒนาเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับนำไปประเมินค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ	353
RE11	การศึกษาการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟิซิลิคอนด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ	357
RE12	การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ผลสำหรับเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับนำไปประเมินค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ	361
RE13	ผลกระทบของฝุ่นต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	365
RE14	การลดลงของสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่	369
RE15	ระบบการจัดการพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีเอเจนต์-เบสสำหรับไมโครกริด	373
RE16	หลักการออกแบบระบบการจัดการแบตเตอรี่ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	377
RE17	โคมไฟถนนพลังงานแสงอาทิตย์ หลอด LED	381
RE18	การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำมันเบนซิน	385
RE19	การศึกษาความเป็นไปได้ของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เพื่อชาร์จโทรศัพท์มือถือโดยใช้ความร้อนจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์	389
RE20	รถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการและผู้สูงอายุ	393
RE21	แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลา	397
RE22	การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบลิฟต์แบบรีเจนเนอเรทีฟ (ERU)	401
RE23	ผลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อสมบัติเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติ	405
RE24	โปรแกรมวัดความเข้มแสงจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กด้วยโปรแกรม Lab View	409
RE25	การพยากรณ์แนวโน้มของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโฟโตโวลตาอิกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	413
RE26	การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานของพัดลมทำความเย็นโดยการติดตั้งอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน	417
RE27	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบปรับมุมรับแสงอัตโนมัติสำหรับการผลิตสินค้า OTOP	421



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

## แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลา Real-time Photovoltaic Module using MATLAB/Simulink Interfacing

เดชนิธิธร อัมปริต<sup>1</sup> และวันชัย ทรัพย์สิงห์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-89796-4375 E-Mail: datnitorn\_tit@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรนำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรของไดโอด, ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำไปพัฒนาวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) เพื่อนำไปประยุกต์เชื่อมต่อกับวงจรแหล่งจ่ายจริงด้วยการ์คอินเตอร์เฟซ เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางพาณิชย์ ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย จากการทดสอบแบบจำลองพบว่าหากเซลล์มีความต้านทานอนุกรมที่ต่ำและค่าความต้านทานขนานที่สูงจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกและฟิลต์แฟกเตอร์ที่สูงขึ้น, ตัวแปรไดโอดและอุณหภูมิทำงานของเซลล์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ และความเข้มแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ความเข้มแสง, อุณหภูมิ

### Abstract

This article presents the MATLAB/Simulink mathematical model of the photovoltaic(PV) cell/module using general equations of solar cell in order to study the affection of irradiance ,temperature ,diode model parameter ,series and shunt resistance of the PV cell comparing to the output power. It will lead to analyse and develop the PV simulator using DSP interfacing card and it may be useful in comparing with the commercial PV cell in case of PV performance and it also useful in case of the development of the PV control system . The results of the PV model therefore must have high value of shunt resistor and low value of series resistor for giving more output power and higher Fill Factor. The diode parameter and temperature affects the change in open circuit voltage of cell. From the simulation result it can be observed that as solar radiation falling on PV cell is reduced, both short circuit current and open circuit voltage decreases, but the change

in open circuit voltage is not as prominent with incident solar radiation as is with short circuit current, which varies almost directly proportional

Keywords: Photovoltaic module, irradiance, temperature

### 1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในประเทศไทยเนื่องด้วยพื้นที่ประเทศตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของโฟโตโวลเทอิก(Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้ เรียกว่า โซลาร์เซลล์ (Solar cell) [1] แต่ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อเสียดังที่ ใช้ต้นทุนในการผลิตและการติดตั้งค่อนข้างสูง ในการทดลองนั้นมักจะมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์และอุณหภูมิที่มากขึ้นน้อยต่างกันไปในแต่ละวันซึ่งส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้ สามารถที่จะใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถจ่ายโหลดได้จริง หากนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล ก็จะเกิดความสะดวกโดยที่สามารถทดลองในช่วงเวลาใดก็ได้ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดหลายประเภท เช่น ไทแรนอมิเตอร์ เป็นต้น

### 2. ทฤษฎี

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

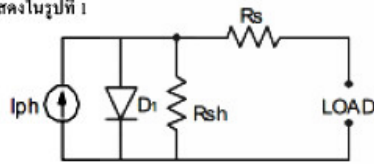
กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photo current) เกิดจากแสงสว่างไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบรอยต่อ PN Junction ซึ่งจะเขียนแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแส ในสมการที่ 1 แสดงถึงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential equation) [2]

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \frac{q(V + IR_s)}{NKT} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

เมื่อ  $I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง ; A  
 $q$  คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C  
 $K$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzman ( $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/°K)  
 $T$  คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ ; Kelvin  
 $V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด ; V  
 $N$  และ  $n_p$  คือ ผลของไดโอด

$R_s$  และ  $R_{sh}$  คือ ความต้านทานอนุกรมและขนานของเซลล์ ;  $\Omega$   
 จากสมการที่ 1 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า มี 5 ตัวแปรที่มีผลต่อกระแสและแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ  $I_p$ ,  $N$ ,  $I_{ph}$ ,  $R_s$  และ  $R_{sh}$

2.1.1 ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ค่า  $I_{ph}$  เป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง (radiation intensity) และอุณหภูมิ ตามสมการที่ 2 [3]

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_1(T - T_{ref})] \lambda \quad (2)$$

เมื่อ  $I_{sc}$  คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25 °C ; A  
 $k_1$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร ; A/°C  
 $\lambda$  คือ ความเข้มแสง ; kW/m<sup>2</sup>

2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ

หากกำหนดให้ความเข้มแสงมีค่าคงที่ จากสมการที่ 2 ค่าอุณหภูมิมิผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรสัมพันธ์อุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมิยังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสของตัวย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode ( $I_s$ ) ดังสมการที่ 3 [3]

$$I_s(T) = I_s \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \left( \frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N V T} \right] \quad (3)$$

เมื่อ  $E_g$  คือ Band gap energy of semiconductor  
 $V_t$  คือ Thermal voltage at room temperature

2.1.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับพิกัดขนาดแรงดันของ

แบตเตอรี่ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ 1 หากไม่คิดผลของ  $R_s$  และ  $R_{sh}$  จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ 4 [2]

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

เมื่อ  $n_p$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน และ  $n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

2.2 กราฟกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้โดยใช้ I-V curve ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถสร้าง I-V curve ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังต่อไปนี้ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ), กระแสขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPP), กระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mp}$ ) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mp}$ ) นอกจากนี้มีค่าเกี่ยวกับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่

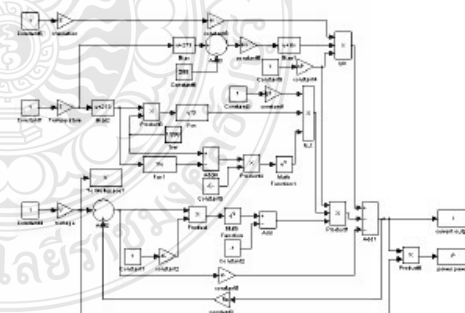
- อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจรคือ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor : FF) เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของโซลาร์เซลล์ สามารถเขียนเป็นสมการที่ 5 [4]

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

- ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ หากได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าขาออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ที่เข้า ( $P_m$ ) เขียนเป็นสมการที่ 6 [1]

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

3. การสร้างแบบจำลอง และส่วนประกอบของระบบ



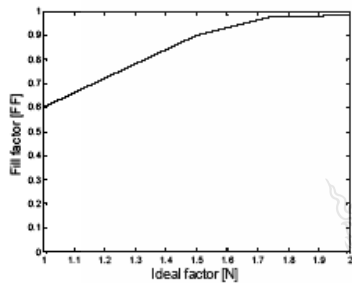
รูปที่ 2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Matlab/simulink จากรูปที่ 2 เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโปรแกรม Matlab/Simulink โดยศึกษาผลกระทบของ 5 ตัวแปรต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ การจำลองได้ใช้ค่า

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX 60 แบบ polycrystalline ขนาด 60 W โดยใช้ค่า  $V_{oc}$  เป็น 21.1 V , $I_{sc}$  เป็น 3.8A,  $K_1$  เป็น 3mA/°C ,N เป็น 1.2 และ  $I_0$  เป็น 100 nA

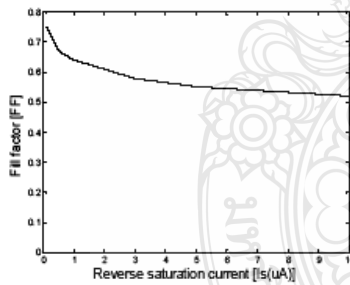
4. การจำลอง และผลการจำลองระบบ

4.1 ผลของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)

ค่า N และ  $I_0$  เป็นผลของไดโอด โดยค่า N ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับการผลิตโครงสร้างของเซลล์ เมื่อค่า N มีค่ามากขึ้นคือ 1.0 ,1.5 และ 2.0 ทำให้ FF มีค่ามากขึ้นตามรูปที่ 3 ส่วนค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายในอัสกลับนั้น เมื่อค่า  $I_0$  มีค่ามากขึ้นคือ 100nA,1 $\mu$ A และ 10 $\mu$ A ทำให้ FF มีค่าลดลงตามรูปที่ 4



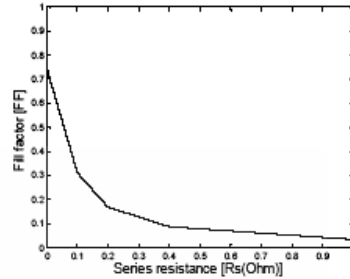
รูปที่ 3 ผลการจำลองผลกระทบของค่า N ต่อค่า FF



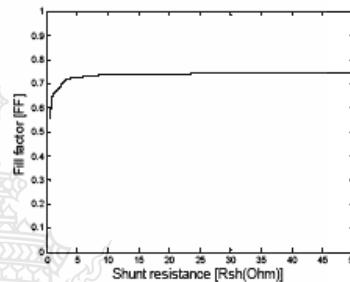
รูปที่ 4 ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $I_0$  ต่อค่า FF

4.2 ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) และ ความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)

ค่า  $R_s$  เป็นความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นรวมกับความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก [1] เมื่อ  $R_s$  มีค่ามากขึ้นคือ 1m $\Omega$  ,0.01 $\Omega$  และ 1 $\Omega$  ทำให้ FF มีค่าลดลงตามรูปที่ 5 ส่วนค่า  $R_{sh}$  เป็นการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการรั่ววงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ [1] เมื่อ  $R_{sh}$  มีค่าลดลงคือ 50 $\Omega$  ,5 $\Omega$  และ 0.5 $\Omega$  ทำให้ FF มีค่าลดลงตามรูปที่ 6

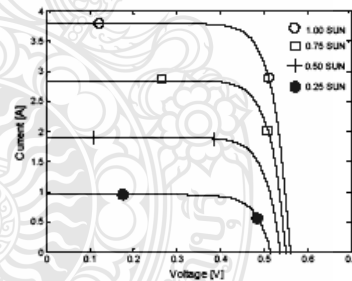


รูปที่ 5 ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $R_s$  ต่อค่า FF



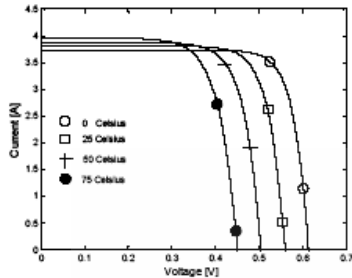
รูปที่ 6 ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $R_{sh}$  ต่อค่า FF

4.3 ผลของความเข้มแสง ( radiation intensity) และ อุณหภูมิ (Cell Temperature)



รูปที่ 7 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า  $\lambda$

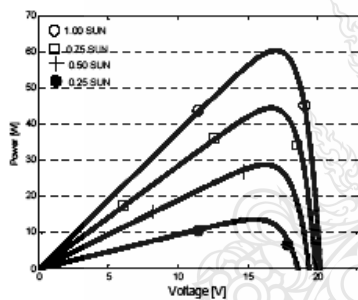
ความเข้มแสงเป็นต้นแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยกระแสไฟที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับแสงสว่างของดวงอาทิตย์ กำหนด  $I_{sc}$  เป็น 3.8A ที่STC ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสง  $\lambda$  เป็น 1.00sun, 0.75sun, 0.50sun และ 0.25sun (T= 25°C) ได้ผล I-V curve ตามรูปที่ 7 ส่วนอุณหภูมิของเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์รอยต่อ P-N มีพลังงานในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสรั่ววงจรเพิ่มขึ้น ความอุณหภูมิแต่ไม่มากนักในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า T เป็น 0°C ,25°C ,50°C และ 75°C ( $\lambda=1000$  W/m<sup>2</sup>) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันขาออกจะลดลงได้ผล I-V curve ตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า T

4.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

การเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมและสะดวกในการใช้งานทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานและอนุกรมกัน ในการจำลองได้นำเซลล์มาต่ออนุกรมจำนวน 36 เซลล์ (Ns=36) จำนวนทางขนานเป็น 1 (Np=1) ได้ผล P-V curve ตามรูปที่ 9 และตารางที่ 1 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX 60



รูปที่ 9 กราฟ P-V Curve การจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 1 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับคุณลักษณะ MSX60

	MSX-60	Simulation	Error
$P_{max}$ (W)	59.85	60.46	1.02%
$V_{mp}$ (V)	17.1	16.99	0.64%
$I_{mp}$ (A)	3.5	3.56	1.71%

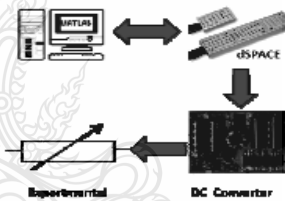
5. สรุป

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink พบว่าค่า N ที่มากขึ้นทำให้ค่า FF สูงขึ้น ค่า I ที่มากขึ้นทำให้ค่า FF ต่ำลง นอกจากนั้นแล้วค่าผลของไดโอด (N<sub>p</sub>) มีผลกระทบต่อค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกของโซลาร์เซลล์ด้วย ค่าความต้านทาน R<sub>s</sub> ที่มากขึ้นมีผลต่อค่า FF ที่ลดลง และค่าความต้านทาน R<sub>sh</sub> ที่น้อยลงทำให้ค่า FF ลดลงด้วยส่งผลให้เซลล์ทำงานได้ไม่ถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้

ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งค่า FF ที่ดีควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับค่าความเข้มแสงจะเป็นตัวกำหนดกระแสขาออกของโซลาร์เซลล์ถ้าความเข้มแสงน้อยกระแสขาออกก็จะต่ำลงด้วย อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง

6. แนวทางการวิจัยพัฒนา

จากการจำลองพบว่านอกจากปัจจัยด้านราคาของระบบที่สูงแล้ว การขาดความรู้ความเข้าใจคุณลักษณะของ PV ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยยังต่ำเมื่อเทียบกับต่างประเทศ ดังนั้นการพัฒนาต่อไปของบทความนี้จะนำ dSPACE DS1104 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลที่มีประสิทธิภาพสูงมาเชื่อมต่อกับแบบจำลองของ PV Module ที่สร้างขึ้นโดยใช้ Real-time Library ซึ่งเป็น blocksets ที่ใช้หลักการของ Digital to Analog Converter เพื่อทำให้เป็นสัญญาณจริงในรูปแบบทันเวลาโดยสามารถปรับค่าตัวแปรสำหรับทดสอบที่มีผลต่อการจ่ายกำลังของ PV Module, โหลดข้อมูล, ควบคุมขั้นตอนการทดสอบและดูผลตอบสนองได้โดยใช้ Control Desk จากนั้นสัญญาณจาก dSPACE DS1104 จะไปควบคุม DC Converter นำไปสู่การทดสอบและวิเคราะห์การจ่ายโหลดแบบเชิงเส้น สามารถทำ I-V Curve, P-V Curve เพื่อพัฒนาระบบควบคุมต่อไป



รูปที่ 10 การเชื่อมต่อแบบจำลองกับแหล่งจ่ายจริงและโหลด

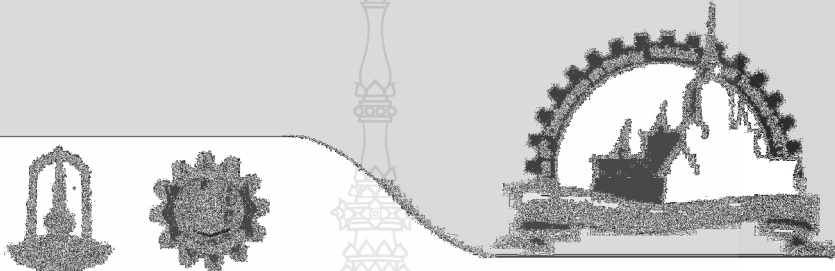
เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญยัง ปัตติกลาง "PHOTOVOLTAIC SYSTEMS" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [2] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri "Matlab/simulink based of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification" INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Volume 1, Issue 3, 2010, pp. 487-500
- [3] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK" Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS, October 22-24, 2008, San Francisco, USA
- [4] Francisco M. Gonzalez-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in Matlab" II CIBELEC, 2005

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

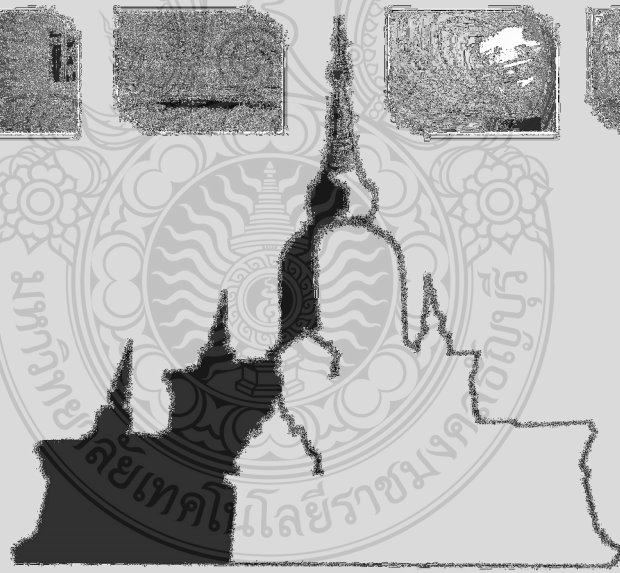

การประยุกต์ใช้การจำลองแบบเรียลไทม์ในการศึกษาและวิจัยด้านพลังงานทดแทน

การประชุมวิชาการระดับชาติด้านพลังงานทดแทนประเทศไทย ครั้งที่ 8  
The 8<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand: E-NETT 8



สนับสนุนโดย

สนับสนุนโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



วันที่ 2-4 เมษายน 2555 โรงแรมดิเอ็มโพวเวอร์ กรุงเทพมหานคร



## รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รศ.ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร. ฐานิตย์ เมธิยานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร. ณีฐฎี กาศยปนนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. นรินทร์ วัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. มานะ อมรกิจบำรุง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สมเกียรติ ปรัชญาวารการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. อติศักดิ์ นาถกรณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สัมพันธ์ ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. เสริม จันทรฉาย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร. จุฬารณย์ เบญจปิยะพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ธนรัฐ ศรีวีระกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ทีบุญมา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. นริส ประทีนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. จีรพรรณ เตียรถสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. สมบูรณ์ เวชกามา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. วันชัย ฉิมฉวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผศ.ดร. ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร. ศิริ ดวงพร	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผศ.ดร. สมชาย มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. บพิตร บุปผาโชติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. ณีฐพล ภูมิสะอาด	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



### รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ(ต่อ)

ผศ.ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. วรวัฒน์ เสรียมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อภินันท์ อูโรโสภณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. กัญย์ วงศ์เกษม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร. ดาเรศน์ กิตติโยภาส	กรมส่งเสริมการเกษตร และสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
อ.ดร. ชลิดา เนียมมัญญ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.ดร. ณรงค์ อังกิมบัววัน	มหาวิทยาลัยบูรพา
อ.ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. จักรมาส เลหาวนิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ณีรัฐ สุวรรณทา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นเรศ มีโส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นิวัตร อังควิษฐพันธ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นุชิตา สุขแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. พลกฤษณ์ จิตต์โต	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ละมุล วิเศษ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุนันทา เลาว์ณย์ศิริ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุพรรณ ยั่งยืน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. อรุมา ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ปรีชา ศรีประภาคาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ศิริลักษณ์ วงศ์เกษม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. วทัญญู รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. ระวี พรหมหลวงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี



## สารบัญ

รหัสบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
RE	<b>Renewable Energy</b>	1
RE01	การศึกษาสมรรถนะของเครื่องกลั่นน้ำทะเลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นสะท้อนรังสี <u>บัญญัติ นิยมवास</u>	3
RE02	การออกแบบระบบเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ย่อยแบบประหยัด <u>สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และ เลิศพันธ์ เพียรสร้างสรร</u>	4
RE03	การคำนวณการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์โดยโอโซนในบรรยากาศของประเทศไทย <u>สายันต์ ไพฑูริกุล</u>	5
RE04	การพยากรณ์แนวโน้มของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากไฟโตโวลตาอิกโดยใช้โครงข่ายประสาท เทียม <u>บัณฑิต ปานท้วม, สมชัย ทวีญูวโรคม และ วันชัย ทวีพยสังข์</u>	6
RE05	เครื่องตัดหญ้าไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ <u>สังคม สัพโส, จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ</u>	7
RE06	หลักการออกแบบระบบการจัดการแบตเตอรี่ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน <u>อภิวัฒน์ อัครเมฆิน และ บุญยัง ปลั่งกลาง</u>	8
RE07	การทดสอบระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์สำหรับอุปกรณ์สะสมความร้อนแบบรวมรังสี ชนิดรางพาราโบล <u>ประภาทิพย์ บุญหล้า, นุชิตา สุวแพทย์, สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และอนุสรณ์ แสงประจักษ์</u>	9
RE09	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทันเวลา <u>เดชนิติน อัมปรีดา และ วันชัย ทวีพยสังข์</u>	10
RE10	การศึกษาการวัดความเร็วลม ด้วยพัดลมระบายความร้อน <u>ณัฐพล แจ่มจงดี และ วันชัย ทวีพยสังข์</u>	11
RE11	การออกแบบเครื่องให้อาหารสัตว์เลี้ยงแบบอัตโนมัติระบบพลังงานแสงอาทิตย์ <u>พลวุฒิ อังกาทิพย์ ชัยยุทธ์ ทวีพยประเสริฐ งามอาจ แสดใหม่ และ สมชัย ทวีญูวโรคม</u>	12
RE12	การออกแบบและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับกังหันน้ำระบบผลิต ไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก <u>ฉัตรชัย งามสม, ชีระศักดิ์ สมศักดิ์, วรจักร เมืองใจ, วิษระ เฟิงภิบาล, เอกณัฐ์ กระจ่างธิมาพร และ บวรศักดิ์ เพชรานนท์</u>	13
RE13	แบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมของดวงอาทิตย์จากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสำหรับ ประเทศไทย <u>เสริม จันทร์ฉาย และเพ็ญพร นิ่มนวล</u>	14
RE14	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ เพื่อการสูบน้ำ <u>ศิลาชัย เพิ่มพูล และ วิรัชย์ ไรยนรินทร์</u>	15





**RE09**      **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทันเวลา**  
**Real-time Simulation using Mathematical model of**  
**Photovoltaic Cell/Module**

เดชนิตติธร อิมปริตา<sup>1,\*</sup> และ วันชัย ทรัพย์สิงห์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-89796-4375 E-Mail: datnititorn\_tit@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นกรนำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรของไดโอด, ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำไปพัฒนาวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) เพื่อนำไปประยุกต์เชื่อมต่อกับวงจรแหล่งจ่ายจริงด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางพาณิชย์ ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย จากการทดสอบแบบจำลองพบว่าหากเซลล์มีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่ำและค่าความต้านทานขนานที่สูงจะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกและฟิลล์แฟกเตอร์ที่สูงขึ้น ตัวแปรไดโอดและอุณหภูมิทำงานของเซลล์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ และความเข้มแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์

**คำหลัก:** 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 affection of solar irradiance ,temperature ,diode model parameter ,series and shunt resistance of the PV cell comparing to the output power. It will lead to analyse and develop the PV simulator using DSP interfacing card and it may be useful in comparing with the commercial PV cell in case of PV performance and it also useful in case of the development of the PV control system . The results of the PV model therefore must have high value of shunt resistor and low value of series resistor for giving more output power and higher Fill Factor. The diode parameter and temperature affects the change in open circuit voltage of cell. From the simulation result it can be observed that as solar radiation falling on PV cell is reduced, both short circuit current and open circuit voltage decreases, but the change in open circuit voltage is not as prominent with incident solar radiation as is with short circuit current, which varies almost directly proportional

**Keywords:** photovoltaic module, irradiance, temperature



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8  
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

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

เดชนิตติธ อัมปรีดา<sup>1,\*</sup> และวันชัย ทรัพย์สิงห์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-89796-4375 E-Mail: datnititom\_tit@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรของไดโอด, ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำไปพัฒนาวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) เพื่อนำไปประยุกต์เชื่อมต่อกับวงจรแหล่งจ่ายจริงด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางพาณิชย์ ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย จากการทดสอบแบบจำลองพบว่าหากเซลล์มีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่ำและค่าความต้านทานขนานที่สูงจะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกและฟิลล์แฟคเตอร์ที่สูงขึ้น ตัวแปรไดโอดและอุณหภูมิทำงานของเซลล์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ และความเข้มแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์

**คำหลัก:** 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 affection of solar irradiance ,temperature ,diode model parameter ,series and shunt resistance of the PV cell comparing to the output power. It will lead to analyse and develop the PV simulator using DSP interfacing card and it may be useful in comparing with the commercial PV cell in case of PV performance and it also useful in case of the development of the PV control system . The results of the PV model therefore must have high value of shunt resistor and low value of series resistor for giving more output power and higher Fill Factor. The diode parameter and temperature affects the change in open circuit voltage of cell. From the simulation result it can be observed that as solar radiation falling on PV cell is reduced, both short circuit current and open circuit voltage decreases, but the change in open circuit voltage is not as prominent with incident solar radiation as is with short circuit current, which varies almost directly proportional

**Keywords:** Photovoltaic module, irradiance, temperature.



## 1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในประเทศไทยเนื่องด้วยพื้นที่ประเทศตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้ เรียกว่า โซลาร์เซลล์ (Solar cell) [1] แต่ระบบของพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อเสียตรงที่ใช้ต้นทุนในการผลิตและการติดตั้งค่อนข้างสูง ในการทดลองนั้นมักจะมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์และอุณหภูมิที่มากน้อยต่างกันไปในแต่ละวันซึ่งส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกันด้วย ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้สามารถที่จะใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถจ่ายโหลดได้จริง หากนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล ก็จะเกิดความสะดวกโดยที่สามารถทดลองในช่วงเวลาใดก็ได้ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดหลายประเภท เช่น ไพราโนมิเตอร์ เป็นต้น

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photo current) เกิดจากแสงสว่างไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อ PN Junction ซึ่งจะเขียนแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแส ในสมการที่ 1 แสดงถึงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

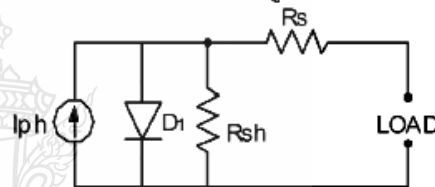
$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \frac{q(V + I R_s)}{N K T} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

$I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง ; A

q	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่า $1.602 \times 10^{-19}$ C
K	คือ ค่าคงที่ของ Boltzman ( $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/°K)
T	คือ อุณหภูมิที่รอยต่อของเซลล์ ; °K
V	คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด ; V
N	คือ Ideal factor
$I_s$	คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด; A
$R_s$	คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ; $\Omega$
$R_{sh}$	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ; $\Omega$

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า มี 5 ตัวแปรที่มีผลต่อกระแสและแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ  $I_s$ , N เป็นผลของไดโอด, ค่า  $I_{ph}$  เป็นผลของแสงที่ตกกระทบบน PV cell และค่า  $R_s$ ,  $R_{sh}$  เป็นค่าความต้านทานซึ่งถือเป็นการสูญเสียที่เซลล์แสงอาทิตย์

### 2.1.1 ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ค่า  $I_{ph}$  นั้นเป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง และอุณหภูมิ ดังสมการที่ 2 [3]

$$I_{ph} = (I_{sc} + k_1 \cdot (T - T_{ref})) \lambda \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้

$I_{sc}$	คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25 °C ; A
$K_1$	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร ; A/°C
$\lambda$	คือ ความเข้มแสง ; kW/m <sup>2</sup>



### 2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ

หากกำหนดให้ความเข้มแสงมีค่าคงที่ จากสมการที่ 2 ค่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรสัมพันธ์อุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมียังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสของตัวย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode ( $I_s$ ) ดังสมการที่ 3 [3]

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

เมื่อกำหนดให้

$E_g$  คือ Band gap energy of semiconductor

$V_t$  คือ Thermal voltage at room temperature

### 2.1.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับพิกัดขนาดแรงดันของแบตเตอรี่ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ 1 หากไม่ติดผลของ  $R_s$  และ  $R_{sh}$  จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ 4 [2]

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

เมื่อกำหนดให้

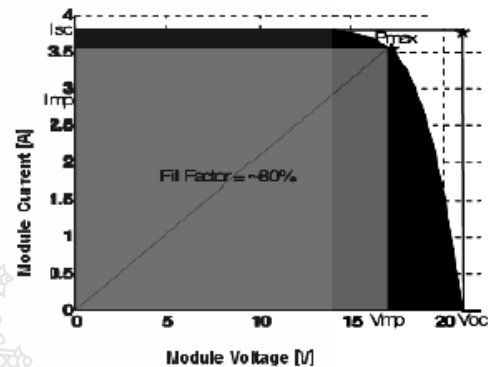
$n_p$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน

$n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

### 2.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ I-V curve ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผง

เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถสร้าง I-V curve ได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า Maximum Power Point (MPP,  $P_{max}$ )



รูปที่ 2 ค่า Fill Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์

การพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังต่อไปนี้ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ), กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPP,  $P_{max}$ ) กระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mp}$ ) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mp}$ ) นอกจากนี้ยังมีค่าที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่

- อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจร เรียกว่า ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor ; FF) เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของโซลาร์เซลล์ดังรูปที่ 2 สามารถเขียนเป็นสมการที่ 5 [4]

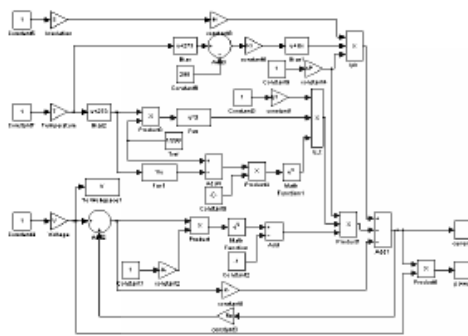
$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (5)$$

- ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ หาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ด้านเข้า ( $P_{in}$ ) สามารถเขียนเป็นสมการที่ 6 [5]

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



3. การสร้างแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Matlab/simulink

จากรูปที่ 3 เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยศึกษาผลกระทบของ 5 ตัวแปรต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการจำลองได้ใช้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX60 แบบ polycrystalline 60 W โดยใช้ค่า  $V_{oc}$  เป็น 21.1 V,  $I_{sc}$  เป็น 3.8A,  $K_1$  เป็น  $3mA/^{\circ}C$ ,  $K_2$  เป็น  $-73 mV/^{\circ}C$ , Ideal factor เป็น 1.2 และ  $I_0$  เป็น 100 nA ดังตารางที่ 1

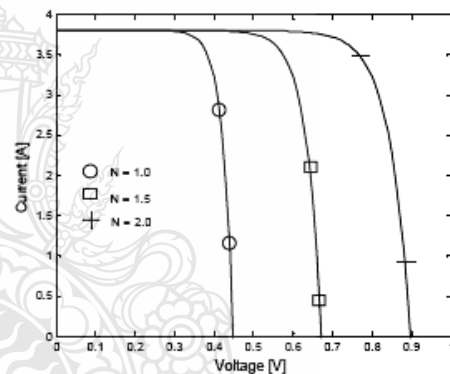
ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางไฟฟ้ารุ่น MSX 60 [3]

Solarex MSX60 Specifications ( $1kW/m^2, 25^{\circ}C$ )	
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	$-73mV/^{\circ}C$
Temperature coefficient of short-circuit current	$3mA/^{\circ}C$
Approximate effect of temperature on power	$-0.38W/^{\circ}C$

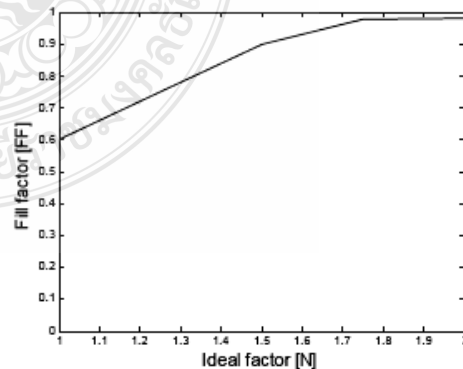
4. การจำลอง และผลการจำลองระบบ

4.1.ผลของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)

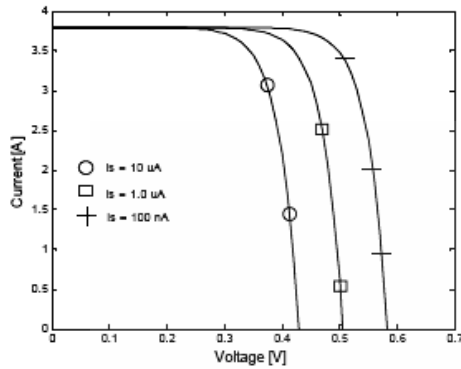
ค่า  $N$  และ  $I_0$  เป็นผลของไดโอด โดยค่า  $N$  ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับการผลิตโครงสร้างของเซลล์ เมื่อค่า  $N$  มีค่ามากขึ้นคือ 1.0, 1.5 และ 2.0 ทำให้แรงดันขาออกของเซลล์มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ FF มีค่ามากขึ้นตามรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ส่วนค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไบอัสกลับนั้น เมื่อค่า  $I_0$  มีค่ามากขึ้นคือ 100nA 1 $\mu$ A และ 10 $\mu$ A ทำให้แรงดันขาออกของเซลล์มีค่าลดลงส่งผลให้ FF มีค่าลดลงตามรูปที่ 6 และรูปที่ 7



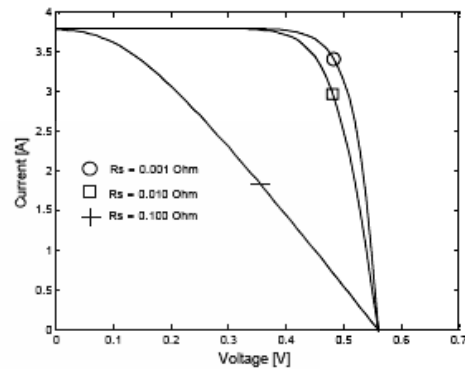
รูปที่ 4 ผลกระทบของค่า N ต่อแรงดันขาออก



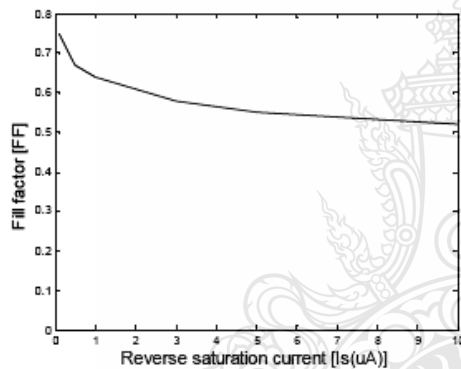
รูปที่ 5 ผลกระทบของค่า N ต่อค่า FF



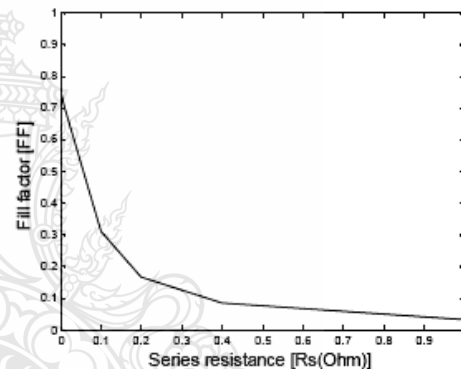
รูปที่ 6 ผลกระทบของค่า  $I_s$  ต่อแรงดันขาออก



รูปที่ 8 ผลกระทบของค่า  $R_s$  ต่อแรงดันขาออก



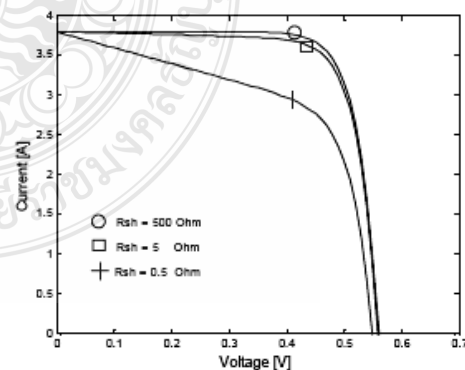
รูปที่ 7 ผลกระทบของค่า  $I_s$  ต่อค่า FF



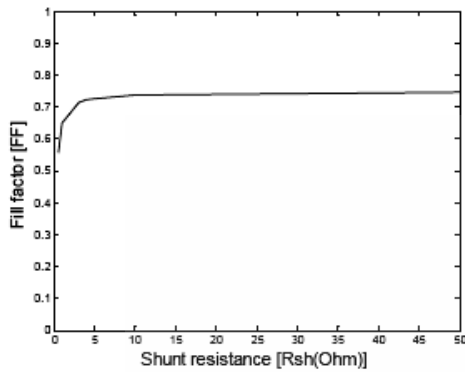
รูปที่ 9 ผลกระทบของค่า  $R_s$  ต่อค่า FF

**4.2.ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) และความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)**

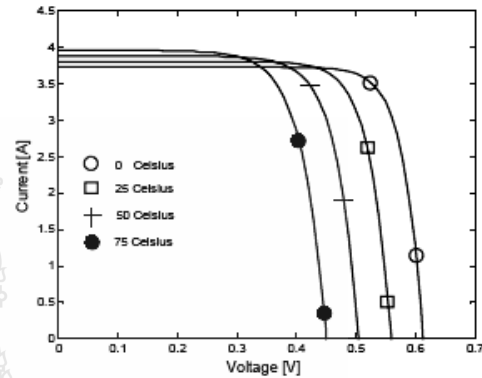
ค่า  $R_s$  เป็นความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นร่วมกับความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก [1] เมื่อ  $R_s$  มีค่ามากขึ้นคือ  $1m\Omega$ ,  $0.01\Omega$  และ  $1\Omega$  จะทำให้ FF มีค่าลดลงตามรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ส่วนค่า  $R_{sh}$  นั้นเป็นการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วนโดยเฉพาะบริเวณใกล้กับขอบของเซลล์ [1] เมื่อ  $R_{sh}$  มีค่าลดลงคือ  $50\Omega$ ,  $5\Omega$  และ  $0.5\Omega$  ทำให้ FF มีค่าลดลงตามรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 ผลกระทบของค่า  $R_{sh}$  ต่อแรงดันขาออก



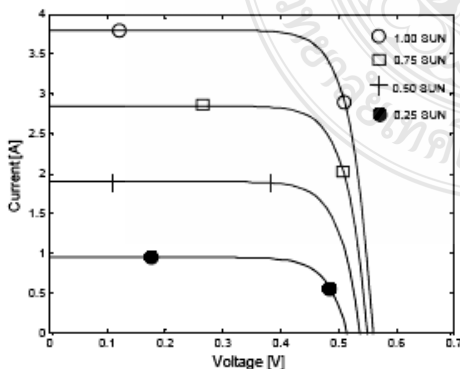
รูปที่ 11 ผลกระทบของค่า  $R_{sh}$  ต่อค่า FF



รูปที่ 13 กราฟ I-V Curve ผลกระทบของค่า T

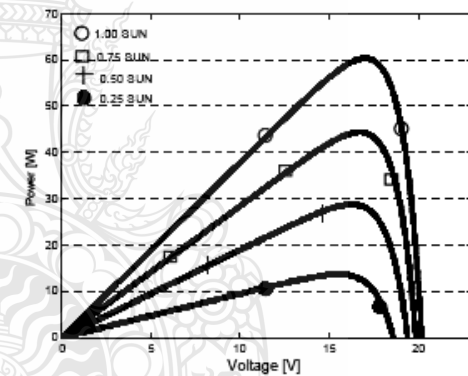
**4.3 ผลของความเข้มแสง ( radiation intensity) และอุณหภูมิ (Cell Temperature)**

ความเข้มแสงเป็นตัวแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนด  $I_{sc}$  เป็น 3.8A ที่ STC ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสงเป็น 1.00sun, 0.75sun, 0.50sun และ 0.25sun ( $T = 25^{\circ}C$ ) ได้ผล I-V curve ตามรูปที่ 12 ส่วนอุณหภูมิของเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหุประจุที่รอยต่อ P-N มีพลังงานในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสตรงจอร์เพิ่มขึ้นตามแต่ไม่มากนักในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าอุณหภูมิ  $0^{\circ}C$ ,  $25^{\circ}C$ ,  $50^{\circ}C$  และ  $75^{\circ}C$  ( $\lambda = 1000 W/m^2$ ) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันขาออกจะลดลงได้ผล I-V curve ตามรูปที่ 13



รูปที่ 12 กราฟ I-V Curve ผลกระทบของค่า  $\lambda$

**4.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( PV Module)**

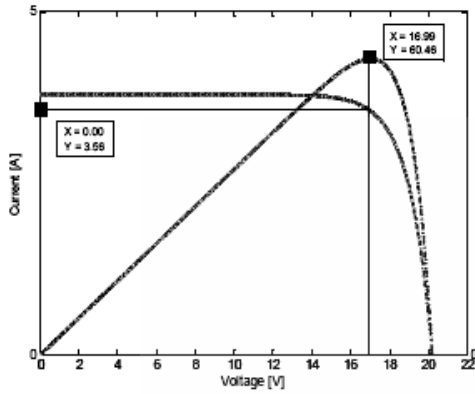


รูปที่ 14 กราฟ P-V Curve แผงเซลล์แสงอาทิตย์

การเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมและสะดวกในการทำงานทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานและอนุกรมกันในการจำลองได้นำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์ จำนวนทางขนานเป็น 1 ได้ผล P-V curve ตามรูปที่ 14 และรูปที่ 15 โดยตารางที่ 2 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น MSX 60 พบว่ามีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เชื่อมต่อกับการ์ตูนเตอร์เฟสเพื่อสร้างสัญญาณจริงต่อไป



5. การเชื่อมต่อการ์ดิอินเตอร์เฟส



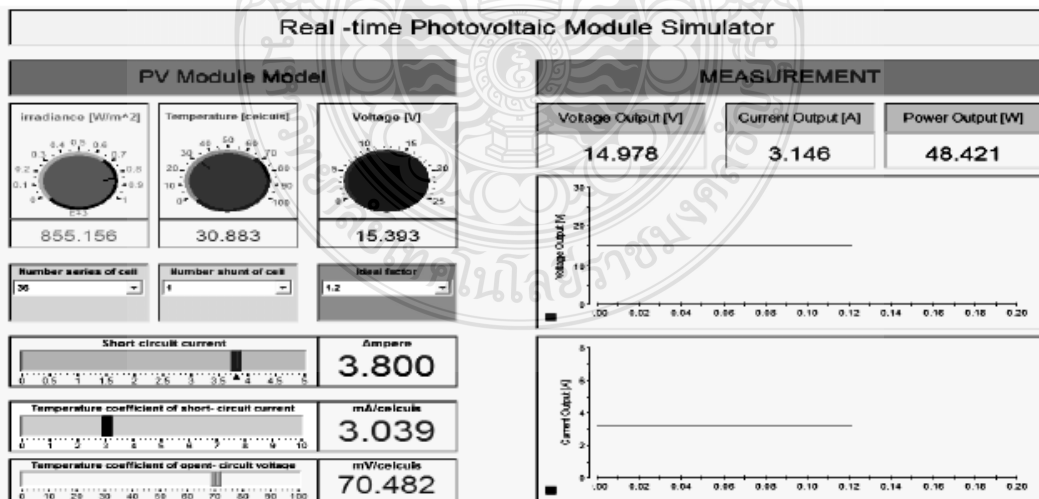
รูปที่ 15 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 16 การเชื่อมต่อแบบจำลองกับแหล่งจ่ายจริง

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับคุณลักษณะ MSX60

	MSX-60	Simulation	Error
$P_{max}(W)$	59.85	60.46	1.02%
$V_{mp}(V)$	17.1	16.99	0.64%
$I_{mp}(A)$	3.5	3.56	1.71%

จากการจำลองพบว่านอกจากปัจจัยด้านราคาของระบบ PV Module ที่สูงแล้วการขาดความรู้ความเข้าใจในคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยยังต่ำเมื่อเทียบกับต่างประเทศ ดังนั้นจึงนำ dSPACE DS1104 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลที่มีประสิทธิภาพสูงมาเชื่อมต่อกับแบบจำลองของ PV Module ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 17 การทดสอบตัวแปรแบบทันเวลาแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Control Desk





โดยใช้ Real-time Library ซึ่งเป็น blocksets ที่ใช้หลักการของ Digital to Analog Converter เพื่อให้เป็นสัญญาณจริงในรูปแบบทันเวลา จากนั้นสัญญาณจาก dSPACE DS1104 จะไปควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ Delta Elektronika Power Supply (SM52-30) ไปสู่โหลด ตามรูปที่ 16 และรูปที่ 17 เป็นการใส่โปรแกรม Control Desk เพื่อควบคุมสัญญาณในรูปแบบทันเวลา โดยสามารถปรับค่าความเข้มแสง อุณหภูมิ, จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมและขนาน, ค่า Ideal factor, ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิขณะลัดวงจร, ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิขณะเปิดวงจร ซึ่งสามารถดูผลตอบสนองของตัวแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV Module เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ PV Module ข้างต้นได้ในขณะเดียวกันตัวแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ Power Supply ก็เปลี่ยนไปด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ PV Module ที่ Control Desk

## 6. สรุป

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink พบว่าค่า  $N$  ที่มากขึ้นทำให้ค่า FF สูงขึ้น ค่า  $I_0$  ที่มากขึ้นทำให้ค่า FF ต่ำลง นอกจากนี้แล้วค่าผลของไดโอด ( $N, I_0$ ) มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกของโซลาร์เซลล์ด้วย ค่าความต้านทาน  $R_s$  ที่มากขึ้นมีผลต่อค่า FF ที่ลดลง และค่าความต้านทาน  $R_{sh}$  ที่น้อยลงทำให้ค่า FF ลดลงด้วยส่งผลให้เซลล์ทำงานได้ไม่ถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งค่า FF ที่ดีควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับค่าความเข้มแสงจะเป็นตัวกำหนดกระแสขาออกของโซลาร์เซลล์ถ้าความเข้มแสงน้อย กระแสขาออกก็จะต่ำลงด้วย อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง สำหรับการเชื่อมต่อในรูปแบบทันเวลาโดยควบคุมผ่านโปรแกรม Control Desk นั้นมีความสะดวกเนื่องจากคอมไพเลอร์ DSP Code เพียงครั้งเดียวจะได้ไฟล์ตัวแปร

ซึ่งสามารถนำไปใช้กับ Control Desk เพื่อการควบคุมแบบทันเวลาได้เลย หากไม่ใช้ Control Desk เมื่อมีการแก้ไขค่าพารามิเตอร์ต่างๆใน Simulink จะต้องคอมไพล์ใหม่ทุกครั้งทำให้เสียเวลาในการทดสอบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญยัง ปลั่งกลาง (2553). PHOTOVOLTAIC SYSTEMS, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [2] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri (2010). Matlab/simulink based of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Vol1.Issue 3. pp. 487-500.
- [3] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG (2008). Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS, San Francisco, USA, 22-24 October
- [4] Francisco M. Gonzalez-Longatt (2005). Model of Photovoltaic Module in Matlab. II CIBELEC
- [5] Piliin Junsangsri, Fabrizio Lombardi (2010). Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model. 25<sup>th</sup> International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems , pp. 240 - 248

## 3.4 Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module under the Single Diode Model

# 10<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

Energy Technology, Environmental  
and Social Impact, Nanotechnology  
and Material Technology, Energy  
Economic and Management, Nuclear  
Technology, New Technology and  
Other topics related to energy field.

On December 5-8, 2012  
Sunee grand hotel,  
Ubon-ratchathani

Organized by



Co-organized by



## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

### International Scientific Advisory Committee:

#### General Chair:

Assoc.Prof.Dr. Namyoot SONGTHANAPITAK RMUTT, Thailand

#### General Co-Chair:

Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Asst.Prof.Dr. Panpetch CHININTORN RMUTT, Thailand

#### Organizing Chair:

Asst. Prof. Dr.Sommai PIVSA-ART RMUTT, Thailand

Prof. Dr. Takeshi YAO Kyoto Uni., Japan

#### Organizing Co-Chair:

Prof. Dr. Hideaki OHGAKI Kyoto Uni., Japan

#### International Scientific Committees:

Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO TU, Thailand

Prof. Dr. Shiro SAKA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Hitomi OHARA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo STADLER FH Koeln, Germany

Prof. Dr. Young S. CHAI Korea

Prof. Dr. Nipon TANGTHAM KU, Thailand

Prof. Dr. Masayoshi OKUBO Osaka Uni, Japan

Prof. Dr. Somchai WONGWISES KMITL, Thailand

Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN UQ, Australia

Prof. Dr. Yukio OGATA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Yuichi ANADA Hokkaido Info. Uni., Japan

Prof.Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Bandit FUNGTAMMASAN KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY IIT-Madras, India

Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN IUPUI, USA

Assoc. Prof. Dr. Per B ZETTERLUND Australia

Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES KMITL, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI Japan

Assoc. Prof. Dr. Thawatch KERDCHEUN RMUTI, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT SWU, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA Nakaoga Uni., Japan

Assoc.Prof.Dr. Kawee SRIKULKIT CU, Thailand

Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI KMUTNB, Thailand

Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPIITAK KU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW RMUTT, Thailand

Asst.Prof.Dr.Supakit SUTTIRUENGWONGSU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Vallop PHUPA RMUTP, Thailand

Asst.Prof.Dr.Pramook UNAHALEKHAKA RMUTSB, Thailand

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

Dr.Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
<b>ASEAN Committee:</b>	
Prof. Dr. Yoyok Wahyu Subroto	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Wega TRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
<b>General Secretary:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
<b>Technical Program Chair:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Technology(ET)</b>	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Environmental and Social Impact(ES)</b>	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nanotechnology and Materials Science(NM)</b>	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Economic and Management(EM)</b>	
Assoc.Prof.Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
<b>Area: New Energy Technology(NT)</b>	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nuclear Technology(NU)</b>	
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

**10<sup>th</sup> EMSES 2012****Exhibition Chair:**

Dr. Amnoiy REUNGWAREE RMUTT, Thailand  
 Dr. Winai CHANPENG RMUTT, Thailand

**Local Arrangement Chair**

Dr. Sorapong PAVASUPREE RMUTT, Thailand  
 Dr. Natee SRISAWAT RMUTT, Thailand

**Registration and Finance Chair**

Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand  
 Dr. Supaporn THOMSORN RMUTT, Thailand  
 Weeraporn PIVSA-ART RMUTT, Thailand

**Publicity Chair**

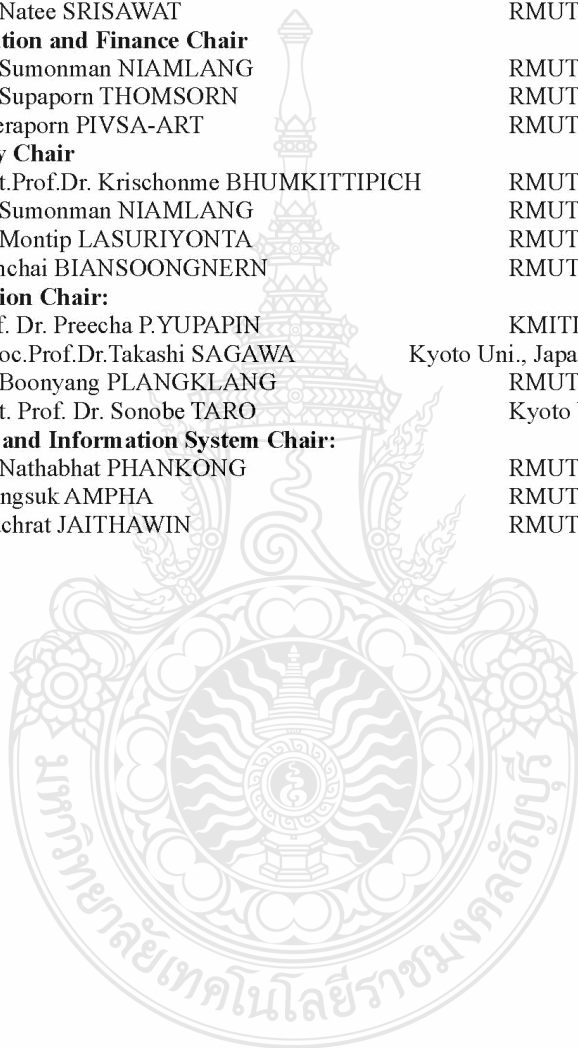
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH RMUTT, Thailand  
 Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand  
 Dr. Montip LASURIYONTA RMUTT, Thailand  
 Somchai BIANSONGNERN RMUTT, Thailand

**Publication Chair:**

Prof. Dr. Preecha P.YUPAPIN KMITL, Thailand  
 Assoc.Prof.Dr.Takashi SAGAWA Kyoto Uni., Japan  
 Dr. Boonyang PLANGKLANG RMUTT, Thailand  
 Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO Kyoto Uni., Japan

**Website and Information System Chair:**

Dr. Nathabhat PHANKONG RMUTT, Thailand  
 Phongsuk AMPHA RMUTT, Thailand  
 Deachrat JAITHAWIN RMUTT, Thailand



---

**CONTENT**
**ENERGY TECHNOLOGY**

<b>ET01</b>	Application of Three-level Diode-clamped Converter on 10 kW Distribution Voltage Restorer <i>W. Chankhamrian, K. Bhunkittipich and N. Mithulananthan</i>	82
<b>ET02</b>	A Design of Single Phase Induction Generator for Waterfall Hydro Turbine <i>Sirichai Dang-eam</i>	87
<b>ET04</b>	Key Cutting Algorithm Application to Measurement Placement for Power System State Estimation <i>Y. Kongjeen, P. Inrawong, K. Buayai and T. Kerdchuen</i>	92
<b>ET05</b>	Hydrolysis of Rice Husk and Sugarcane Bagasse by Reflux Method <i>K. Kumproa and A. Nuntiya</i>	95
<b>ET06</b>	Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum Pipeline System <i>B. Topradith, K. Bhunkittipich and T. Suwanasri</i>	98
<b>ET07</b>	<i>N, N</i> -Dimethylpyrrolidinium Fluorohydrogenate Ionic Liquid - Polymer Composite Membranes for a Non-Humidified Fuel Cell <i>P. Kiatkittikul, R. Taniki, K. Matsumoto, T. Nohira and R. Hagiwara</i>	102
<b>ET09</b>	Screening of bulk heterojunction polymer: fullerene based organic solar cells through simple mist spray coating <i>Jae-hyeong Le<sup>1</sup>, Takashi Sagawa and Susumu Yoshikawa</i>	106
<b>ET10</b>	Renewable Energy Based Active Cooling System <i>Boonrit Prasartkaew</i>	109
<b>ET11</b>	Improvement of Zinc-Air fuel cell performance by gelled KOH <i>A. Puapattanakul, S. Therdthianwong, A. Therdthianwong and N. Wongyao</i>	114
<b>ET12</b>	Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module under the Single Diode Model <i>D. Impreeda and W. Subsingha</i>	118

---

## Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module under the Single Diode Model

D. Impreeda and W. Subsingha

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110  
E-mail: datnitom\_tit@hotmail.com

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

**Keywords**— Photovoltaic module, Solar irradiance, temperature.

### 1. INTRODUCTION

Solar cells is the devices that convert photons into electric potential in PN silicon junction (or other material)[1]. The photovoltaic system is a highly popular renewable energy source due to their energy-friendly environment[2]. Due to their high costs, it may cause the difficulties in development and experiments of laboratory photovoltaic converter systems. Mean by that A photovoltaic simulator which can emulates the output characteristics of photovoltaic module through a hardware of converter circuit can be used in replacement of actual photovoltaic modules.

### 2. PHOTOVOLTAIC EQUIVALENT MODEL

#### 2.1. Modeling of PV cell

Thus the simplest equivalent circuit of solar cell is a current source in parallel with a diode; this model is derived from the physical body of P-N junction. When it exposed to light, a current that is proportional to the solar irradiance is generated[3]. The electrical equivalent circuit of a solar cell under the Single Diode Model is shown in Figure1.

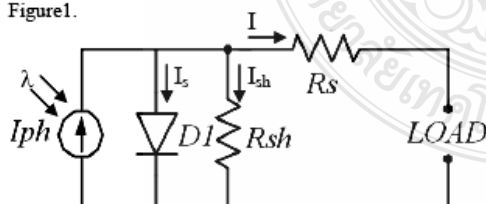


Fig. 1 Single diode model with  $R_s$  and  $R_{sh}$

The circuit of Figure1 is described by the Shockley diode equations by incorporating a diode quality factor in account of the recombination effects in the space-charge region [3]. The current equations are given by [1]

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \frac{q(V + IR_s)}{NKT} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

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

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

In (1),  $I_{ph}$  is the photo generation current,  $R_s$  is the series resistance,  $R_{sh}$  is the shunt or parallel resistance,  $N$  is the diode ideality factor,  $K$  is the Boltzman constant,  $q$  is the electron charge and  $I_s$  is the reverse saturation current of diode. In (2),  $K_I$  is cell's short-circuit current temperature coefficient,  $I_{sc}$  is cell's short circuit current and  $\lambda$  is the solar irradiance. In(3),  $E_g$  is band gap energy of the semiconductor and  $V_t$  is thermal voltage at room temperature. The complete behaviour of PV cells are described by five model parameters ( $I_{ph}$ ,  $N$ ,  $I_s$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ) which is representative of the physical behavior of PV cell/module. These five parameters of photovoltaic cell/module are related to two environmental conditions of solar irradiance and temperature[1].

#### 2.2. Modeling of the PV Module

A solar photovoltaic module is a congregation of solar PV cells in series in order to produce a compatible voltage to charge a standard battery. The PV cell voltage-current relationship in eq.(1) is modified for PV Module by neglecting  $R_s$  and  $R_{sh}$  and is now given as eq.(4)[1].

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left( \exp \frac{qV}{NKT n_s} - 1 \right) \quad (4)$$



Where  $n_s$  is the number of series connecting cells in the PV module and  $n_p$  is the number of parallel connecting cells in the PV module

- **Fill factor (FF):** the short circuit current and open circuit voltage are the maximum current and voltage of a solar cell; in theory, the product of the short circuit current and the open circuit voltage is the maximum power of a solar cell[3].

The fill factor is defined as the ratio of the actual maximum obtainable power, ( $V_m I_m$ ) to the theoretical (but not actually obtainable) power, ( $I_{sc} V_{oc}$ ). It is given as[3].

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \tag{5}$$

- **Maximum efficiency ( $\eta$ ):** is the ration between the maximum output power and the input power[4].

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \tag{6}$$

### 3. MATLAB MODEL OF PV CELL/MODULE

#### 3.1. Mathematical model of the Photovoltaic

The Solarex MSX60 PV module was chosen for modeling, which provides 60 watt of nominal maximum power, and has 36 series connected polycrystalline silicon cells. The key specifications are shown in Table1[5].

Table 1. Typical electrical characteristic of MSX-60

Solarex MSX60 Specifications (1kW/m <sup>2</sup> , 25°C)	
Characteristics	SPEC
Typical peak power ( $P_m$ )	60 W
Voltage at peak power ( $V_m$ )	17.1 V
Current at peak power ( $I_m$ )	3.5 A
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	3.8 A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	21.1 V
Temperature coefficient of open-circuit voltage ( $\beta$ )	-73mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current ( $\alpha$ )	3mA/°C
Approximate effect of temperature on power	-0.38W/°C

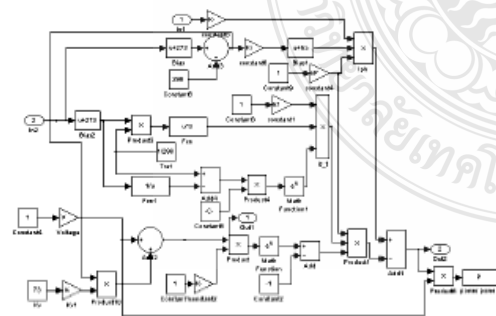


Fig. 2(a) Simulink model of PV Module

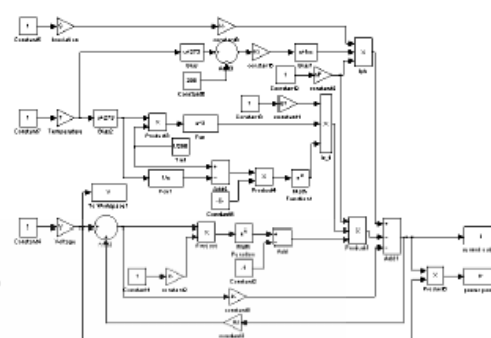


Fig. 2(b) Simulink model of PV Cell

The model of the PV module was implemented using a MATLAB/Simulink program. The model parameters are evaluated during execution using the equations listed on the previous section. The program, calculate the current and voltage, using typical electrical parameter of the module:  $I_{sc}=3.8A$ ,  $V_{oc}=21.1V$ ,  $\beta=3mA/°C$ ,  $\alpha=-73mV/°C$   $N=1.2$ ,  $I_s=100nA$  and the variables Irradiation ( $\lambda$ ) Temperature (T). The proposed model is implemented and shown in Figure 2(a) and Figure 2(b)

#### 3.2. PV model based DC-DC Converter

A photovoltaic simulator that emulates the output characteristics of photovoltaic modules can be used in replacement of an actual photovoltaic modules [6]. The PV simulator is mainly consists of a buck converter and a control system which is using dSPACE DS1104. The output of a buck converter is real time adjustment by the control system in order to produce external output following the current-voltage (I-V) characteristics of such PV modules. Figure3 represents the MATLAB model of the DC chopper circuit, where  $V_o$  is the output voltage,  $V_i$  is the input voltage and D is the duty cycle of the PWM waveform[7]. A current transducer (CT) was used to detect the output current and then sent back to the controller board (DS1104) in order to calculate PWM triggering signal for IGBT of the converter.

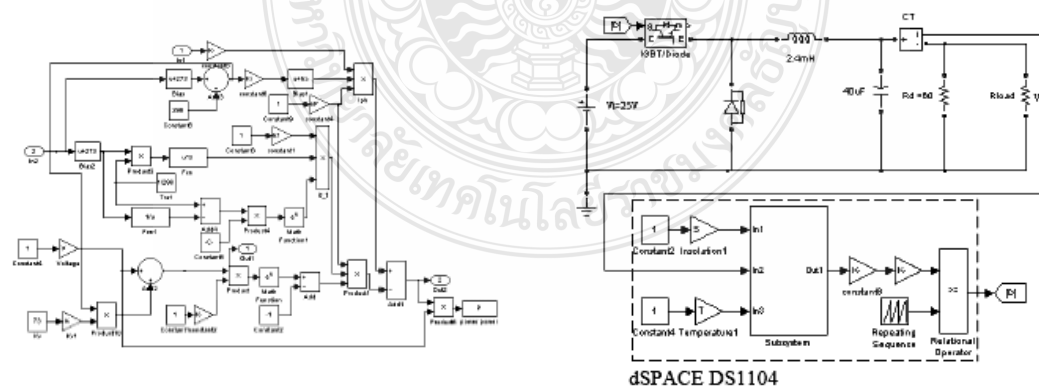


Fig. 3 Block diagram of real time simulator



Table 2 shows the parameters of the simulator

Parameter	Value
Input Voltage	25 V
Output Voltage	7V-22V
Switching freq.	10 kHz
Inductance	2.4 mH
Capacitance	40 $\mu$ F
Load Resistance	2 $\Omega$ -49 $\Omega$

#### 4. SIMULATION RESULTS

##### 4.1. THE PV CELL

##### 4.1.1. Diode Parameter ( $I_s$ and $N$ )

The simulation graph of Figure 4(a) shows I-V curve of PV cell for three different values of reverse saturation current of diode ( $I_s$ ) corresponding to 100nA, 1 $\mu$ A, and 10 $\mu$ A respectively. The effect of increasing  $I_s$  is obviously seen as a correspond decreasing of open circuit voltage and Figure 4(b) shows I-V curve of PV cell for three different values of ideal factor ( $N$ ) corresponding to 1.0, 1.5 and 2.0. It can be observed that as we increase value of  $N$ , the open circuit voltage of cell increases

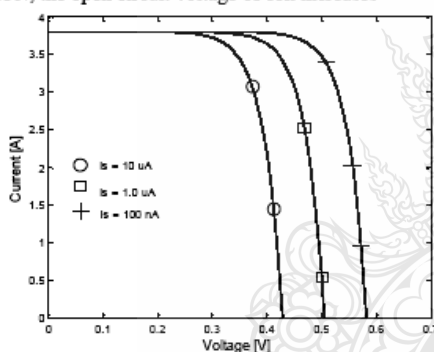


Fig. 4(a) I-V output characteristics with varying  $I_s$

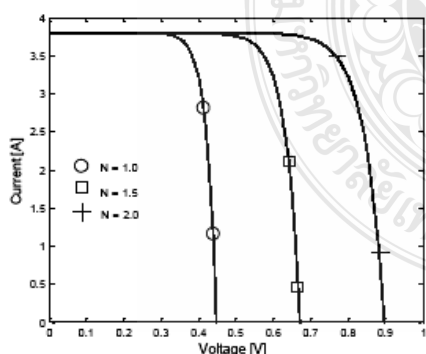


Fig. 4(b). I-V output characteristics with varying  $N$

##### 4.1.2. Series Resistance ( $R_s$ ) and Shunt Resistance ( $R_{sh}$ )

The simulation graph of Figure 5(a) shows I-V curve of PV cell for three different values of  $R_s$  as 1m $\Omega$ , 0.01 $\Omega$  and 1 $\Omega$  respectively. The effect of increasing  $R_s$  is obviously seen as corresponding decrease the Fill factor (FF)

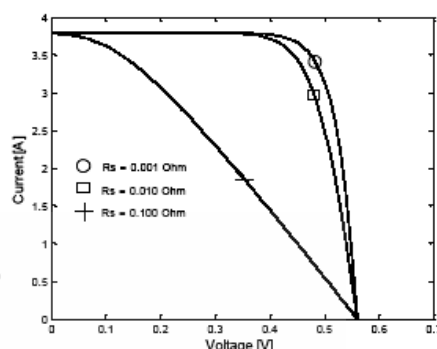


Fig. 5(a) I-V output characteristics with varying  $R_s$

Figure 5(b) shows I-V characteristics of PV cell for three different values of  $R_{sh}$  corresponding to 500 $\Omega$ , 5 $\Omega$  and 0.5 $\Omega$ . The effect of decrease  $R_{sh}$  is obviously seen as corresponding decrease the Fill factor (FF). All practical PV cell therefore must have high value of  $R_{sh}$  and low value of  $R_s$  for giving more output power and higher Fill Factor.

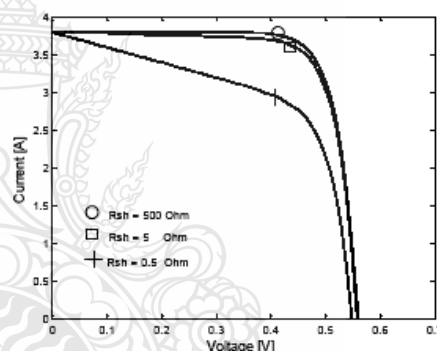


Fig. 5(b) I-V output characteristics with varying  $R_{sh}$

##### 4.1.3. Solar irradiance ( $\lambda$ ) and Temperature ( $T$ )

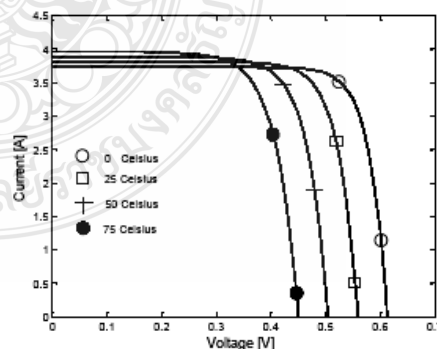


Fig.6. I-V output characteristics with varying  $T$

The nonlinear nature of PV cell is apparent as shown in the figure 6-7, i.e., the output current of PV cell depend on the cell's terminal operating voltage, temperature and solar irradiance as well. We find from Figure 6 that the

increasing of working temperature, the short-circuit current of the PV cell will increase. In the other ways, increasing in output current will lead to a decreasing of PV output, which the net power output of PV always decrease at higher temperature. On the other hand, from Figure 7, the increasing of solar irradiance, short-circuit current of PV module will be increased, and the maximum output power may also increasing. The reason is the open-circuit voltage is logarithmically depend on the solar irradiance, yet the short-circuit current is directly proportional to the radiant intensity.

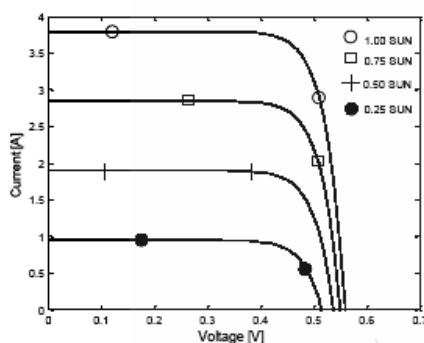


Fig.7. I-V output characteristics with varying  $\lambda$

#### 4.2. PV MODULE

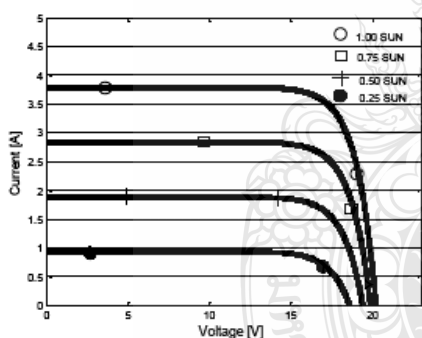


Fig.8. I-V output characteristics of PV module

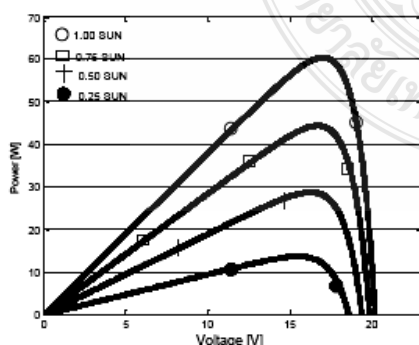


Fig.9. P-V output characteristics of PV module

In a PV module there is only one path available for conduction of current due to the cells are connected in series, therefore  $n_p = 1$ . The number of series connected cells in the PV module which is used for experimental work here is 36 hence  $n_s$  is taken as 36. Hence PV module simulation study is identical with the PV cell study, the simulation result the I-V curve of a PV module is shown in Figure 8 and Figure 9 represents the P-V curve of a PV module

Table 3 shows the comparison between PV module model and electrical characteristics of photovoltaic (MSX60) found that the error is acceptable thresholds

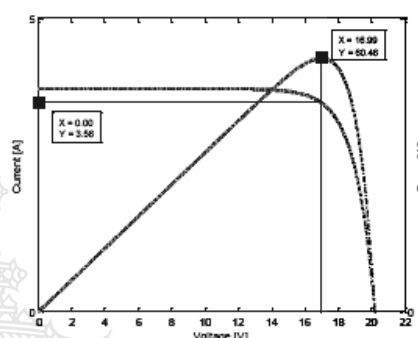


Fig.10. Maximum power point of PV module model

Table 3. 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%

#### 4.3. PV MODELING WITH DC CHOPPER

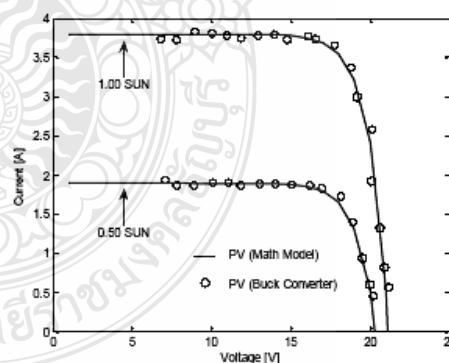


Fig. 11 I-V curve of PV module under different solar irradiance ( $T=25^\circ\text{C}$ ) compared PV based DC-DC Converter

The output voltage of the DC-DC converter in the project is designed to be adjust from 7V to 22V. In order to test the PV based DC-DC converter, an adjustable resistor ( $R_{load}$ ) is used by changing the value of resistor from  $2\Omega$  to  $49\Omega$ . As shown in Figure 11, Comparing I-V curve the mathematical model of the PV with PV model based DC-DC Converter it show that I-V curve of the PV

simulator via DC converter is quite exactly to the I-V curve of MSX60 PV module, Particularly in both different solar irradiance , but in the same temperature

## 5. CONCLUSIONS

This paper has considered the operation of a solar cell under the single diode model. The following conclusion can be drawn from the results of this paper.

- The simulation results of the PV model (Fig.4 to Fig.7) the efficiency has a direct relationship with photo generation current( $I_{ph}$ ), diode ideal factor( $N$ ) and shunt resistance( $R_{sh}$ ), but an inverse relation the reverse saturation current ( $I_s$ ), series resistance( $R_s$ ) and cell temperature( $T$ )
- A real-time simulator of a photovoltaic module based DC-DC converter circuit, in this paper is controlled by the computer DSP interfacing board (DS1104) using the PWM principle. The simulation results of the PV simulator using DC chopper circuit were closely identity with the simulation result of PV module model which is using general equations of solar cell.(Fig.11) The PV simulator can be used for analysis in the field for the P-I-V characteristic of the PV module and could be using in the development of the PV control system.

## REFERENCES

- [1] Savita Nema, R.K.Nema and Gayatri Agnihotri. 2010. Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/ module/ array and their experimental verification. In *International Journal of ENERGY AND ENVIRONMENT*. Volume 1, Issue 3 , pp. 487-500.
- [2] A. bilsalam, J. Haema, I. Boonyaroonate and V.Chunkag. 2011. Simulation and study of Photovoltaic cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load. In *8<sup>th</sup> International Conference on Power Electronic –ECCE Asia*. The Shilla Jeju, Korea, May 30–June 3, pp. 3033-3036.
- [3] Pilin Junsangsri and Fabrizio Lombardi. 2010. Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model. In *25<sup>th</sup> International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*, pp. 240-248.
- [4] Francisco M. Gonzalez-Longatt. 2005. Model of Photovoltaic Module in Matlab<sup>TM</sup>. In *II CIBELEC*.
- [5] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su. 2008. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCEC. san Francisco, USA, October 22-24*.
- [6] Qingrong Zeng, Pinggang Song and Liuchen Chang . 2002. A PHOTOVOLTAIC SIMULATOR BASED ON DC CHOPPER. In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. pp.257-261.
- [7] Wanchai Subsingha. 2008. Power Electronic (*Academic book*), Thailand. RMUTT printing.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายเชชนิตธร อิมปริดา
วัน เดือน ปีเกิด	11 มกราคม 2518
ที่อยู่	9/2 หมู่ที่ 12 ต.เชิงรกรากน้อย อ.บางปะอิน จ.อยุธยา 13180
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี พ.ศ. 2543
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2540 – พ.ศ. 2544	อาจารย์ประจำแผนกช่างไฟฟ้า โรงเรียนเทคนิคพัฒนการอยุธยา
พ.ศ. 2545 – พ.ศ. ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำแผนกช่างไฟฟ้า โรงเรียนฐานเทคโนโลยี

