

**การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี และ ฟัซซี่ ลอจิก ชนิดทันเวลา**  
**Real-time Photovoltaic Simulator using PID and Fuzzy Logic Control**มาลี พัฒน์ช่วย<sup>1</sup> และ วันชัย ทรัพย์สิงห์<sup>1</sup><sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

E-mail: lee\_eei@hotmail.com; wanchai.s@en.rmutt.ac.th

**บทคัดย่อ**

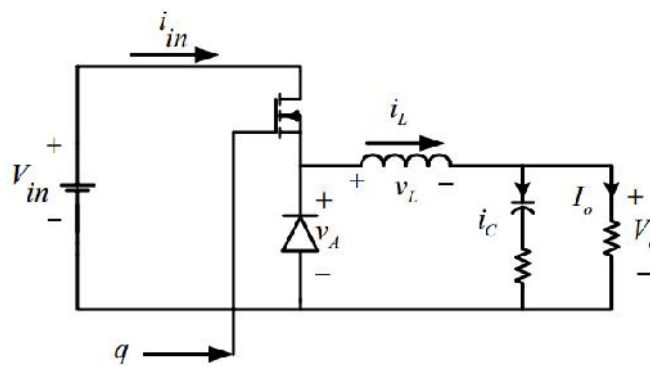
งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการแสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม เป็นต้น โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีลักษณะการทำงานแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ ทั้งนี้ในบทความนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณารูปคุณลักษณะต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด ทั้งนี้วิธีการป้อนกลับสามารถประยุกต์ได้ทั้งแบบ PID Control และ Fuzzy Logic Control

**คำสำคัญ:** ค่าความเข้มแสง, ค่าอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม**1. บทนำ**

ในปัจจุบันนี้พลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานที่ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน คือพลังงานไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ยังไม่คงที่ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ ในบทความนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณารูปคุณลักษณะต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด

**2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง****2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน**

วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสตรง หรือวงจร Buck Converter เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าต่ำกว่าแรงดันขาเข้า หรือ กระแสไฟฟ้าขาออกสูงกว่ากระแสขาเข้า และเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกมีการกระเพื่อมจากสัญญาณควบคุม ตัวเก็บประจุซึ่งต่ออยู่กับโหลดจะเป็นตัวลดแรงดันกระเพื่อมที่ขาออก เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนและเพื่อให้แรงดันขาออกมีความเป็นไฟตรงมากๆ ลักษณะวงจรทอนระดับแรงดัน และการทำงานเป็นดังภาพ



รูปที่ 1 วงจรทอนระดับแรงดัน

สมการคำนวณค่าตัวชี้ใช้เคล็ดได้จาก



$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \tag{1}$$

สมการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เล็ก ( $L_{min}$ ) ได้จาก

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

สมการคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้้อัรราระลอกคลื่น ได้จาก

$$C = \frac{(1-D)}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \tag{3}$$

## 1.2 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี

วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่เป็นที่นิยมมีอยู่ 2 วิธีคือ

1.2.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (open Loop Control system) เป็นการใช้อุปกรณ์ Controller หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองที่เราต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณา

1.2.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System) จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุทที่จะให้กับระบบ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราก็จะได้ว่าค่าเอาต์พุทของระบบเป็นไปตามต้องการ โดยการเลือกใช้เลือกตัวควบคุมที่เหมาะสม

1.2.3 การควบคุมแบบ พี ไอ ดี หรือ PID controller แบ่งออกเป็นสามส่วน คือ

1.2.3.1 Proportional model of Control (P-control) หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน โดยการเพิ่มค่าอัตราขยาย (Gain) ให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำได้ผลการตอบสนองที่ไวขึ้น

1.2.3.2 Integral Mode of Control (I-Control) หรือตัวควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถใช้งานเดี่ยวๆ ได้แต่ต้องปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสม และสามารถขจัด steady state error ได้

1.2.3.3 Derivative Mode of Control (D-Control) หรือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะช่วยลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot ในระบบวงปิด ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

1.2.3.4 การปรับแต่ง parameters ของ P, PI หรือ PID มี 2 ลักษณะดังนี้

Open Loop จะได้ค่าของตัวควบคุม P, PI, PID ตามตาราง

	Kp	Ti	Td
P	1/RL	---	---
PI	0.9/RL	L/0.3	---
PID	1.2/RL	2L	0.5L

Closed Loop จะได้ค่าของตัวควบคุม P, PI, PID ตามตาราง

	Kp	Ti	Td
P	0.5/Kcr	---	---
PI	0.45/Kcr	1/1.2Pcr	---
PID	0.6/Kcr	0.5Pcr	0.125Pcr

Kcr : Critical Gain หรือ Ultimate Gain : Ku

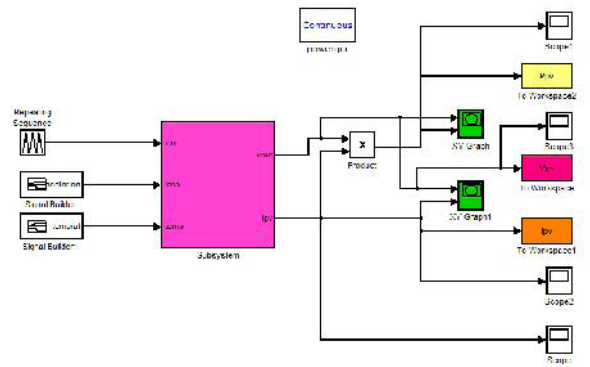
จาก PID Transfer function ค่าตั้งควบคุมที่ใช้ในการปรับระบบของการจำลองนี้คือ

Kp=0.2; Ki=0.5; Kd=0.3

### 3. การทดสอบ

ทำการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยสัญญาณควบคุมจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกไปสู่วงจรสร้างสัญญาณแบบ PWM ได้ค่าตัวที่ไซเคิลเพื่อนำไปขับเคลื่อนการทำงานของ IGBT ในวงจรทอนระดับแรงดันให้ได้ค่าคุณลักษณะของกระแส แรงดัน เป็นไปตามการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในที่นี้จะกล่าวถึงการออกแบบในส่วนของการซอฟต์แวร์ โดยโครงสร้างงานวิจัยชิ้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และอีกส่วนคือวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการทำงานเชื่อมต่อกับการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อนำไปสู่การสร้างสัญญาณจริงที่เหมาะสมในการทดสอบการจ่ายโหลด ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทั้งหมดดังรูปที่ 3

#### 3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจำลองได้โดยสมการไดโอดในอุดมคติ ดังสมการ (4)

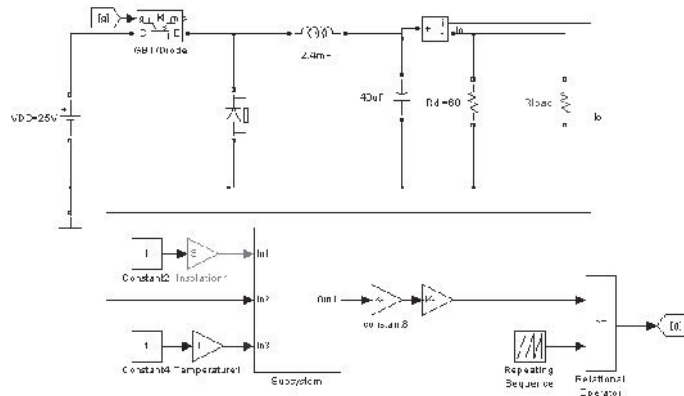
$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{q(V + I \cdot R_s)}{N \cdot K \cdot T} - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{SH}} \quad (4)$$

ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์ ได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟโตกับความเข้มแสงอาทิตย์ สามารถเขียนได้ดังสมการ (5)

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i (T - T_{ref})] \cdot \lambda \quad (5)$$

ผลกระทบจากอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงมากขึ้น สามารถเขียนได้ดังสมการ (6)

$$I = I_s (t) \left[ \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (6)$$



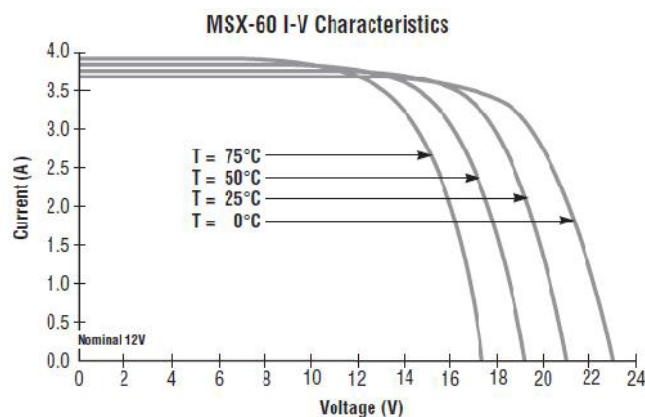
รูปที่ 3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

Typical Electrical Characteristics of Photovoltaic Modules Solarex model MSX60	
Electrical Characteristics	Specification
Maximum power (Pmax)	60 W
Voltage @ Pmax (Vmp)	17.1V
Current @ Pmax (Imp)	3.5A
Guaranteed minimum Pmax	58W
Short-circuit current (Isc)	3.8A
Open-circuit voltage (Voc)	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	$-(80 \pm 10) \text{mV}/^\circ\text{C}$
Temperature coefficient of short-circuit current	$(0.065 \pm 0.015) \%/^\circ\text{C}$
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05) \%/^\circ\text{C}$
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	$47 \pm 2^\circ\text{C}$

3.2 ออกแบบและสร้างวงจรทอนระดับแรงดัน โดยการนำกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองมาเป็นตัวคำนวณหาค่าของอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับแรงดัน

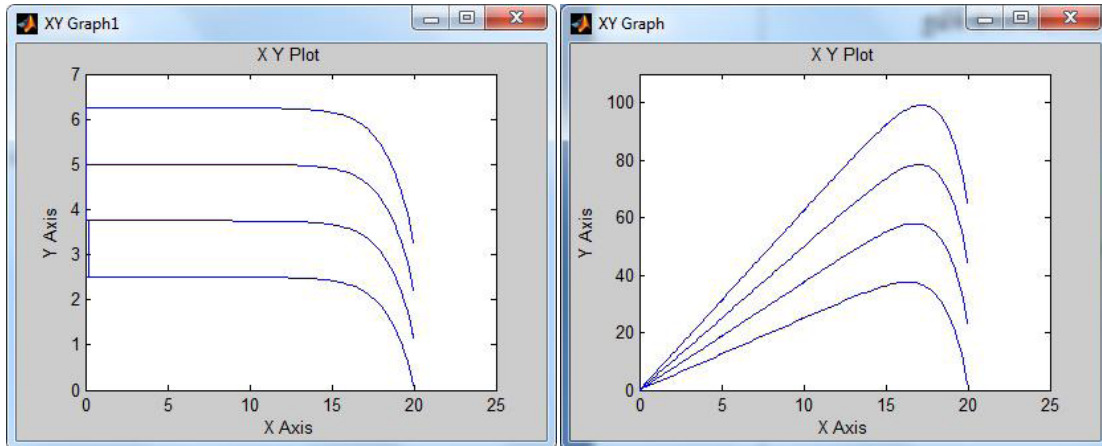
เชื่อมต่อวงจรเข้ากับวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM ซึ่งจะไปควบคุมค่าตัวดีไซเคิลของสัญญาณพัลส์ซบเกิดของวงจรทอนระดับแรงดัน เพื่อการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกโดยใช้การปรับค่าตัวดีไซเคิลของสัญญาณพัลส์ซบเกิดของไอจีบีที เพื่อให้การจ่ายกำลังของวงจรทอนระดับเป็นไปตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ทดสอบเปรียบเทียบค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิแตกต่างกันกับแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



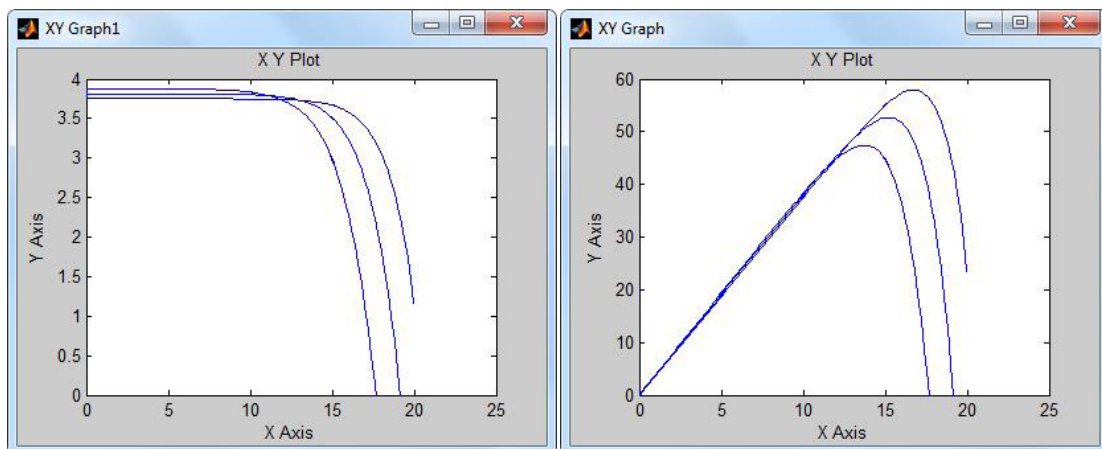
รูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น MSX60

ผลการทดลอง ในรูปที่ 5 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5 กราฟ i-v curve เมื่อทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มแสง และอุณหภูมิคงที่

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ ค่าความเข้มแสงคงที่ จะได้ค่าความเปลี่ยนแปลงของกราฟคุณลักษณะของ p-v ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟ p-v curve เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ

	MSX60	Simulations	Deviation	Target
Pmax (W)	60.0	57.9	3.5%	± 5%
Vmax (V)	21.1	20.0	5.2%	± 5%
Imax (A)	3.8	3.75	1.3%	± 5%

#### 4. สรุปผล

จากการจำลองค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ และจำลองการทำงานด้วย MATLAB/Simulink เพื่อให้กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ I-V curve ในการจำลองให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุดนั้น จากผลการจำลองนี้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับกราฟที่อ้างอิง เป็นที่พอใจ แต่ในงานวิจัยนี้ ส่วนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นในการพัฒนาการวิจัยต่อไป คือทำการจำลองการป้อนกลับด้วยวิธีผ่านชุด Hardware และใช้วิธีการป้อนกลับวิธีการอื่นมาเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้ผลจำลองมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด เช่น การนำ Fuzzy Logic Control มาใช้ เป็นต้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hayrettin CAN “Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink” Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk J Elec Eng & Comp Sci (2013) 21: 301 -308, 2013
- [2] M. Abdulkadir, A. S. Samosir and A. H. M. Yatim “MODELING AND SIMULATION BASED APPROACH OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN SIMULINK MODEL” ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 7, NO. 5, MAY 2012, pp 616-623
- [3] Samer Alsadi, Basim Alsayid “Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm” International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 2, Issue 6, December 2012, ISSN: 2277-3754, pp 80-85
- [4] Geoff Walker “EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL” pp
- [5] เดชนิตติธ อิมปรีดา, วันชัย ทรัพย์สิงห์ “Real- time Simulation using Mathematical model of Photovoltaic Cell/Module” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, ENETT8-RE09 1/8-8/8, 2555
- [6] R.Raja, L.Udhaya kumar, S.Rakesh kumar “FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY SIMULATOR” R.Raja et al. / International Journal of Engineering and Technology (IJET), ISSN : 0975-4024, Vol 5 No 2, Apr-May 2013, pp 1625-1630