



มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
SRIPATUM UNIVERSITY

รายงานการวิจัย  
เรื่อง

ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย  
แบบมัลติเฟส

IMPACT OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ON MULTIPHASE  
DISTRIBUTION NETWORKS

ภรชัย จุฬนุวัฒน์กุล

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม  
ปีการศึกษา 2556

## คำนำ

โครงการวิจัยนี้เกิดจากการสนับสนุนให้กับบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยศรีปทุม โดยได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยประเภททุนนักวิจัยรุ่นใหม่ เพื่อผลิตผลงานวิจัยที่มีคุณภาพและเผยแพร่ ออกสู่ภายนอก ทั้งนี้เพื่อให้คณาจารย์ได้มีการพัฒนาความรู้และประสบการณ์ทางวิชาการอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิชาการด้านการใช้พลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานจากแสงอาทิตย์ และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย และยินดีน้อมรับคำแนะนำ เพื่อปรับปรุงแก้ไขต่อไป

นายภรชัย จุณนวัฒน์กุล

ผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2558

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณทั้งหมด และได้ให้เวลาในการทำโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ดร.คมสันต์ ดาโรจน์ ผู้ทรงคุณวุฒิที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงตลอดการดำเนินงานและการเขียนรายงานวิจัยนี้

นายภรชัย จุณวัฒนกุล

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2558

หัวข้อวิจัย : ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส  
ผู้วิจัย : นายภรชัย จุณนุวัฒน์กุล  
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีปทุม บางเขน  
ปีที่พิมพ์ : พ.ศ.2558

---

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสทั้งทางด้านสแตติกและไดนามิก โดยจำลองสถานการณ์แบบสแตติกของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสเพื่อทำการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบโดยใช้ดัชนีวีอาร์ไอ และหาผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ค่าความสูญเสียของกริด โหลดดึงแพคเตอร์สูงสุด และเปอร์เซ็นต์แพคเตอร์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า แล้วทำการเพิ่มระดับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปอรฺยูนิต หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบสแตติกมาจำลองสถานการณ์แบบไดนามิก เพื่อหาผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส

งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอขั้นตอนการหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย เริ่มจากทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบโดยใช้ดัชนีวีอาร์ไอ เพื่อทำการหาระดับการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สูงสุดโดยสมมุติว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ และพิจารณาถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ที่จุดเชื่อมต่อและบริเวณใกล้เคียง ขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสอยู่ในขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปอรฺยูนิต แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ แบบไดนามิก เพื่อหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มี

การกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอชพีท ที่ค่าโหลด 3 ระดับคือ โหลดระดับต่ำ โหลดระดับฐาน และ โหลดระดับสูง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบสแตติกและไดนามิกก็พบว่า ค่า ระดับแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ในขอบเขตสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาในกรณีที่ไม่มีคิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานไปเล็กน้อย ในกรณีที่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์นั้น ระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อจะมีค่าเกินกว่าขอบเขตของค่ามาตรฐานไปมาก ส่วนกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์จะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า และการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ตรงตามมาตรฐานในการเชื่อมต่อก็อาจทำให้แรงดันที่บัสอื่นๆ เกินกว่ามาตรฐานได้ ซึ่งสามารถนำผลวิจัยนี้มาใช้ในการวางแผนและการดำเนินงานต่างๆ ทางระบบไฟฟ้ากำลังได้

**คำสำคัญ :** ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส  
ระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส การกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า  
การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า

Research Title : Impact of Photovoltaic Systems on Multiphase distribution  
Networks

Name of Researcher : Mr. Parachai Juanuwattanakul

Name of Institution : Department of Electrical and Applied Electronic Engineering,  
School of Engineering, Sripatum University, Bangkok

Year of Publication : B.E. 2558

---

## ABSTRACT

This research studies the impact of photovoltaic (PV) systems on multiphase distribution networks in case of static and dynamic analyses. Firstly, static simulations are performed in the IEEE multiphase 34 node test feeder to install PV systems at the weakest bus using bus voltage ranking indices (VRI) and the impacts of PV systems on voltage profile, grid loss, maximum loading factor and percent of voltage unbalance factor are investigated. Then, PV penetration levels are increased by evaluating their impacts on voltage profile while considering the voltage limits at all buses in the range of 0.95-1.05 per unit. After that, the simulation results from static analysis are applied to dynamic simulations to highlight the impact of PV systems based on the generation profile on voltage profiles.

This research also presents the algorithm to determine the maximum penetration level of PV systems by considering power fluctuation of PV systems with the interconnection of PV to distribution networks. Initially, the bus voltage ranking indices (VRI) are used to find the weakest bus and the maximum power generated by constant PV is determined by considering the voltage change at each bus in the range of 0.95-1.05 per unit. Then, the simulation results are compared with dynamic analyses to determine the maximum penetration level of the PV output power fluctuation at three load levels: low load, base load and peak load.

The results from static and dynamic analyses indicate that the voltage profiles of all buses remain in the limit for constant PV systems. However, PV systems based on the generation profile are applied to the networks without voltage regulators; the voltage at the point of installation is slightly over the limit. Furthermore, in the case with voltage regulators, the voltage at the point of installation is extremely over the standard. In case of the PV output power fluctuation, the maximum penetration level of PV systems is decreased when compared to the case without power fluctuation. In addition, PV systems which are connected at the bus within standard voltage limits may cause over voltage at other buses. These research findings can be used for the planning and the operation of power systems.

**Keywords:** photovoltaic system, multiphase distribution network, voltage profile,  
power fluctuation, voltage fluctuation

## สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
	1.3 คำถามการวิจัย .....	3
	1.4 สมมุติฐานการวิจัย.....	4
	1.5 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
	1.6 นิยามศัพท์ .....	5
2	วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	6
	2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย .....	6
	2.2 ทฤษฎีที่รองรับเรื่องที่วิจัย .....	6
	2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	8
	2.4 สรุป .....	9
3	ระเบียบวิธีการวิจัย.....	10
	3.1 รูปแบบการวิจัยหรือแบบแผนการวิจัย .....	10
	3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	10
	3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	10
	3.4 เครื่องมือการวิจัย .....	11
	3.5 การรวบรวมข้อมูล.....	15
	3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	15



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	16
	4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส.....	16
	4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า ในระบบจำหน่าย .....	20
5	สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	26
	5.1 สรุปการดำเนินการวิจัย .....	26
	5.2 สรุปผลการวิจัย .....	26
	5.3 อภิปรายผล .....	27
	5.4 ข้อเสนอแนะ .....	27
	บรรณานุกรม .....	28
	ภาคผนวก.....	31
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลจำเพาะของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 บัส .....	32
	ภาคผนวก ข. ตารางค่าระดับการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์....	42
	ประวัติย่อผู้วิจัย.....	47

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีต่างๆ.....18
2	ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ .....21
3	ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาทพุท .....22
4	ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาทพุท โดยพิจารณาขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่บัส 890 .....24

## สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาตามสภาพภูมิอากาศ...2	
2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 Node Test feeder .....3	
3 ระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส IEEE 34 node test feeder โดยติดตั้ง PV ที่บัส 890 ..... 12	
4 กำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงใน แต่ละช่วงเวลา ..... 12	
5 ระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส IEEE 34 node test feeder ที่มีการกำหนดโซน เป้าหมายสำหรับพิจารณาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสภายในโซน..... 13	
6 กำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ใน 24 ชั่วโมงที่มีการระเหิมของ กำลังไฟฟ้าเอาท์พุท จากกำลังผลิตติดตั้งขนาด 1MWp..... 13	
7 โพล์ซาร์ทขั้นตอนสำหรับการหาค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจาก แสงอาทิตย์ที่มีการระเหิมของกำลังไฟฟ้า ..... 15	
8 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแต่ละบัสของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสมาตรฐาน..... 17	
9 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสหลังจากติดตั้ง PV ขนาด 848 kW..... 18	
10 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแต่ละบัสหลังจากติดตั้ง PV ขนาด 949 kW ..... 19	
11 ผลของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาต่อระดับแรงดันที่บัส 890 ของระบบมัลติเฟส ไม่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์..... 19	
12 ผลของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาต่อระดับแรงดันที่บัส 890 ของระบบมัลติเฟส ที่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ..... 20	
13 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัส ที่โหนดระดับต่ำกว่าก่อนที่จะติดตั้ง PV ..... 22	

## สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

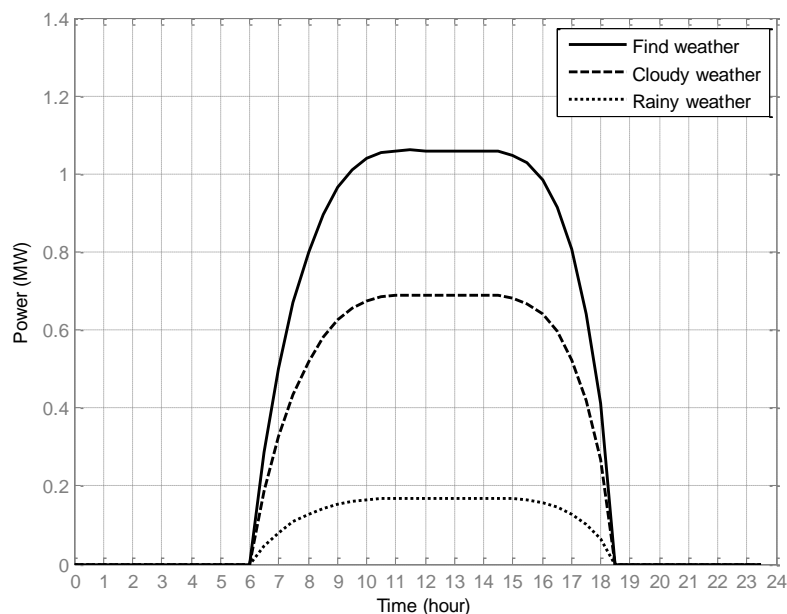
ภาพประกอบ	หน้า
14	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 832 ที่โหลดระดับต่ำ.....23
15	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 832 ที่โหลดระดับฐาน.....23
16	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 850 ที่โหลดระดับสูง .....24
17	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส บัส 890 และ 832 โดยพิจารณาขีดจำกัดสำหรับการ เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่บัส 890 เป็นหลัก .....25

# บทที่ 1

## บทนำ

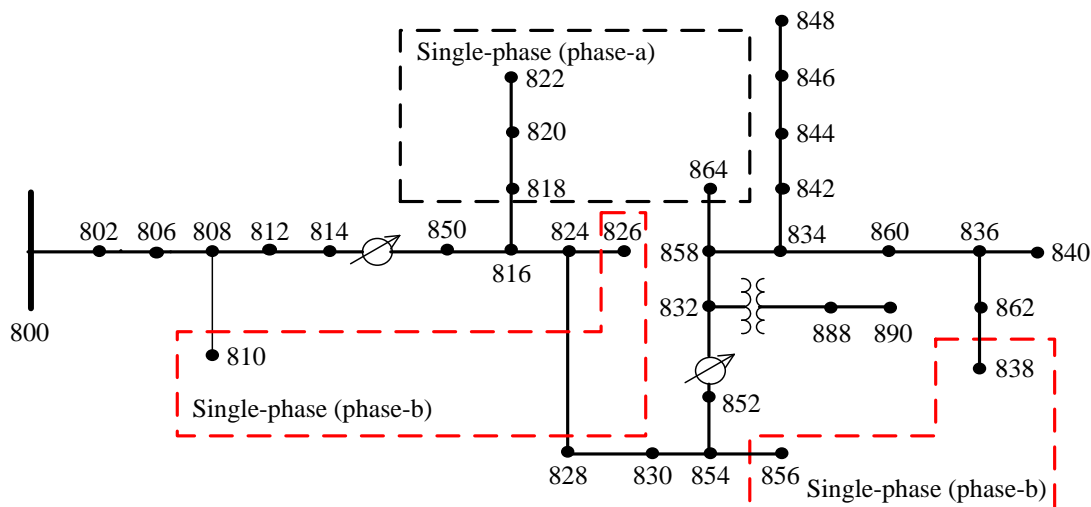
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอนาคตข้างหน้า ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีมากขึ้น แต่ความมั่นคงด้านพลังงานจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์มีความผันผวนสูง รัฐจึงได้ส่งเสริมให้มีการลงทุนทางด้านพลังงานหมุนเวียนที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เพื่อลดคาร์บอนและก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะการผลิตกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) เนื่องจากติดตั้งง่าย เพียงแต่ต้องอาศัยพื้นที่ จึงมีนโยบายจากคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) ให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้านครหลวง และกระทรวงพลังงานเป็นผู้รับซื้อไฟฟ้าคืนจากผู้ลงทุน ในราคาพิเศษ ทั้งนี้ระบบหนึ่งๆ จะต้องมีขนาดไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ สำหรับระบบ 33 kV และไม่เกิน 8 MW สำหรับระบบ 22 kV (เรียกว่า ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก หรือ Very Small Power Producer: VSPP) โดยในการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนที่ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะได้อัตราที่สูงกว่าพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น ทำให้มีผู้ขอยื่นความต้องการเสนอขายไฟฟ้าจากระบบแสงอาทิตย์มากขึ้นเกินกว่าที่กำหนด ทางคณะกรรมการนโยบายแห่งชาติจึงหยุดรับคำร้องขอยื่นขายไฟฟ้าจากโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากการเพิ่มระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มากเกินไป อาจทำให้การดำเนินงานและควบคุมยุ่งยากขึ้น หรือมีผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า และเกิดผลเสียกับระบบไฟฟ้าได้ กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าไม่คงที่ ดังแสดงในภาพประกอบ 1 เนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและฤดูกาล ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ และอาจทำให้แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ หรือบริเวณใกล้เคียงเกิดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า (Voltage fluctuation) ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่อยู่ในระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น การศึกษาหาผลกระทบจากการเชื่อมต่อของพลังงานหมุนเวียนที่ติดตั้งในพื้นที่ต่างๆ ในระบบจำหน่าย โดยคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในแต่ละบัส (Voltage profile) ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบ (Total power losses) และเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า (Voltage stability) ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาใช้ในการวางแผนและการดำเนินงานต่างๆ ทางระบบไฟฟ้ากำลัง ได้



**ภาพประกอบ 1** กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาตามสภาพภูมิอากาศ (สุทธาสินี โพธิ์อ่อง, คมสันต์ หงษ์สมบัติ และ วิชัย สุระพัฒน์, 2554)

ทั้งนี้ การวิเคราะห์จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา ที่ติดตั้งตามตำแหน่งของโหลดต่างๆ ของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 Node Test feeder ดังแสดงในภาพประกอบ 2 เพื่อประเมินผลกระทบของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย และทำการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของพลังงานหมุนเวียนที่สามารถจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส โดยที่ระบบยังรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อต่างๆ ได้ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน  $\pm 5\%$  และหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของพลังงานหมุนเวียนที่สามารถติดตั้งได้ โดยที่ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสยรวมของระบบต่ำสุด ผลที่ได้จากการศึกษา สามารถนำมาหาข้อกำหนดหรือทำเป็นมาตรฐานในการเชื่อมต่อพลังงานหมุนเวียน



ภาพประกอบ 2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 Node Test feeder (P. Juanwattanakul, and M.A.S. Masoum, 2012: 1262-1271)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้า โดยคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา

1.2.2 เพื่อหาขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถติดตั้งเพิ่มขึ้นในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสได้ โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1.2.3 เพื่อหาขนาดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสได้ ที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมมีค่าต่ำสุด

## 1.3 คำถามการวิจัย

1.3.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา จะมีผลต่อ แรงดันไฟฟ้าของระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า ของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสอย่างไร

1.3.2 การเพิ่มระดับการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายมัลติเฟสมีข้อดีข้อเสียอะไรบ้าง และเราสามารถเพิ่มระดับการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ

ไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่าไร โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมยังคงอยู่ภายในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1.3.3 ระดับการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าควรเป็นเท่าใด โดยที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบมีค่าต่ำที่สุด

## 1.4 สมมุติฐานการวิจัย

1.4.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา อาจจะมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าของระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า โดยเฉพาะระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส ซึ่งเป็นระบบที่ไม่สมดุลทั้งในส่วนของตัวระบบและไม่สมดุลเนื่องจากโหลด

1.4.2 การเพิ่มระดับการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายมัลติเฟส อาจทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจนเกินขอบเขตมาตรฐาน ดังนั้นการเพิ่มระดับการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าควรจะมีค่าๆ หนึ่งที่เหมาะสมสำหรับระบบ โดยที่ระบบยังสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตได้

1.4.3 การเพิ่มระดับการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายมัลติเฟส อาจทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้ในช่วงแรก แต่เมื่อระดับการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียน่าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการไหลกลับของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการเพิ่มระดับการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าควรจะมีค่าๆ หนึ่งที่เหมาะสมสำหรับระบบ ถึงแม้ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องติดตั้งกำลังการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบจะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

### 1.5.1 กลุ่มเป้าหมาย หรือประชากร

ทดสอบวิธีการที่นำเสนอกับระบบจำหน่ายมัลติเฟสมาตรฐาน IEEE 34 Node Test Feeder

### 1.5.2 เนื้อหาของการวิจัย



การวิจัยนี้เป็นการหาผลกระทบจากการเพิ่มระดับการผลิตกำลังไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสไม่สมดุลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา และหาขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถติดตั้งเพิ่มขึ้นในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสได้ โดยที่ระดับของแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในขอบเขต  $\pm 5\%$  จากค่าปกติและทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสที่จะนำมาใช้วิเคราะห์คือ ระบบจำหน่ายมัลติเฟสมาตรฐาน IEEE 34 Node Test Feeder เนื่องจากระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส เป็นระบบที่มีความไม่สมดุล (Unbalance) ทั้งในส่วนของโครงสร้างตัวระบบและโหลด ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า จะเป็นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส (Three-phase power flow)

### 1.5.3 ระยะเวลา 1 ปี

## 1.6 นิยามศัพท์

Grid loss	ค่าความสูญเสียของกริด
Multiphase Distribution Network	เครือข่ายระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส เป็นระบบจำหน่ายที่ไม่ได้มีเฉพาะส่วนที่เป็นสามเฟสอย่างเดียว อาจมีส่วนที่เป็นหนึ่งเฟส สองเฟส และสามเฟส อยู่ในเครือข่ายของระบบไฟฟ้า
Power Fluctuation	การกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า
Three-phase power flow	การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีความไม่สมดุล
Voltage Fluctuation	การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า
Voltage imbalance	ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า
Voltage profile	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแต่ละบัส
Voltage stability	เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า สามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า
Voltage stability margin	ขอบเขตของเสถียรภาพแรงดัน

## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส เริ่มจากการจำลองสถานการณ์แบบสแตติกของระบบจำหน่ายไอทริปเปิ้ลอิมัลติเฟส 34 โหนด เพื่อทำการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบโดยใช้ดัชนีวีอาร์ไอ และหาผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ค่าความสูญเสียของกริด โหลดดึงแพคเตอร์สูงสุด และเปอร์เซ็นต์แพคเตอร์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า แล้วทำการเพิ่มระดับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปอรยูนิต ขั้นตอนสุดท้ายนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบสแตติกมาจำลองสถานการณ์แบบไดนามิก เพื่อหาผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส

#### 2.2 ทฤษฎีที่รองรับเรื่องที่วิจัย

##### 2.2.1 การจัดลำดับบัสของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส

ในการจัดลำดับบัสเพื่อหาบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสจะใช้ดัชนีวีอาร์ไอ (Bus voltage ranking indices, VRI) นิยามจากอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าลำดับบวกที่จุดพังทลาย (Collapse point) ต่อแรงดันไฟฟ้าลำดับบวกในกรณีที่ไม่มีโหลด (No-load) (P. Juanuwattanukul, and M.A.S. Masoum, 2012: 1262-1271) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$VRI_j^{multiphase} = \frac{V_{j,collapse}^+}{V_{j,no-load}^+} \quad \text{สมการที่ (1)}$$

สมการที่ (1) สามารถใช้ในการจัดอันดับบัสเพื่อหาบัสที่อ่อนแอที่สุดของระบบที่เป็นสามเฟสสมดุลและระบบมัลติเฟสที่ไม่สมดุลได้ โดยบัสที่มีค่าดัชนีวีอาร์ไอต่ำสุดจะเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ

## 2.2.2 ผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส

### 2.2.2.1 ผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส

ในระบบสามเฟสสมดุลการแสดงค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส มักจะถูกพล็อตโดยใช้ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS voltage) แต่สำหรับระบบมัลติเฟสในบทความนี้จะพล็อตระดับแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปอรียูนิต เพื่อใช้ในการดูว่าระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าหรือไม่

### 2.2.2.2 ผลกระทบต่อค่าความสูญเสียของกริด

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง (Active power loss reduction, ALR)(P. Juanwattanukul, and M.A.S. Masoum, 2012: 1262-1271) เนื่องจากการเชื่อมต่อบริษัทผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$ALR = \frac{P_{loss} - P_{loss}^{PV}}{P_{loss}} \times 100\% \quad \text{สมการที่ (2)}$$

โดย  $P_{loss}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียรวมขณะที่ไม่มี PV

$P_{loss}^{PV}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียรวมขณะที่มี PV

### 2.2.2.3 ผลกระทบต่อขอบเขตของเสถียรภาพแรงดัน

ขอบเขตเสถียรภาพของแรงดัน หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โหลดดิ่งแพคเตอร์สูงสุด (Maximum loading factor, MLF) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้ก่อนที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพ  $P_{maxload}$  ต่อค่ากำลังไฟฟ้าฐาน  $P_{baseload}$  (P. Juanwattanukul, and M.A.S. Masoum, 2012: 1262-1271) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$MLF = \frac{P_{maxload}}{P_{baseload}} \quad \text{สมการที่ (3)}$$

### 2.2.2.4 ผลกระทบต่อแฟคเตอร์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

แฟคเตอร์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า (Voltage unbalance factor, VUF) นิยามจากอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าลำดับลบต่อแรงดันไฟฟ้าลำดับบวก (R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, and H.W. Beaty, 1996) ซึ่งเปอร์เซ็นต์แฟคเตอร์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$\% VUF = \frac{\text{Negative-sequence voltage}}{\text{Positive-sequence voltage}} \times 100\% \quad \text{สมการที่ (4)}$$

### 2.2.3 การกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและฤดูกาล ทำให้เกิดการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า (Power fluctuation) โดยค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output power) ที่ผลิตได้ในแต่ละวันมีค่าไม่คงที่ และอาจทำให้แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ หรือบริเวณใกล้เคียงเกิดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า (Voltage fluctuation) (ภรชัย จุณนุวัฒน์กุล กীরติ ชยะกุลศิริ และ นิमित บุญภิรมย์, 2556) ทั้งนี้ผู้ผลิตไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบจะต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้สอดคล้องกับมาตรฐานในการเชื่อมต่อในภาวะปกติโดยมีขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage change) ไม่เกิน  $\pm 5\%$  ของแรงดันพิกัด

### 2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเริ่มมีการเชื่อมต่อพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบจำหน่ายมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ไม่มีเสียงรบกวน และเป็นพลังงานสะอาด แต่ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวันจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและฤดูกาล ทำให้การพยากรณ์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์มีความซับซ้อนมากขึ้น ในงานวิจัยของ สุภาสิณี โพธิ์อ่อน และคณะ (2554) ได้นำเสนอแบบจำลองการพยากรณ์การใช้ไฟฟ้าระยะสั้นในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะโดยคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการพยากรณ์ความต้องการระยะสั้นได้อย่างดีและเหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ และเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์จำนวนมากเข้าสู่ระบบจำหน่ายก็อาจทำให้มีผลต่อการดำเนินงาน และความมั่นคงของระบบไฟฟ้า จึงมีผู้เสนอวิธีการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง DG ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสซึ่งมีความไม่สมดุลของตัวโครงสร้างระบบและความไม่สมดุลของโหลด ทั้งนี้ในการติดตั้ง DG จะสามารถติดตั้งในระบบได้สูงสุดได้เพียงสองตำแหน่ง และระดับการผลิตไฟฟ้าของ DG จะมีค่าคงที่ (P. Juanuwattanukul, and M.A.S. Masoum, 2012: 1262-1271) ได้มีผู้เสนอวิธีการหาระดับของการเชื่อมต่อระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถจ่ายเข้าสู่ระบบ โดยที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น (L. Chia-Hung, H. Wei-Lin, C. Chao-Shun, H. Cheng-Ting and Te-Tien Ku, 2012) งานวิจัยของ M. E. Baran, H. Hooshyar, S. Zhan and A. Huang, (2012) ได้ศึกษาถึง

ผลกระทบของระดับการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับสูงต่อการป้องกันและแรงดันไฟฟ้า งานวิจัยของ M. E. Baran, H. Hooshyar, Z. Shen, J. Gajda and K. M. M. Huq (2011) ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการทำงานและการป้องกันระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากระดับกำลังการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่ระดับ 100% รวมถึงผลกระทบที่มีต่อแรงดันไฟฟ้า และในงานวิจัยของ S. A. Pourmousavi, A. S. Cifala, M. H. Nehrir (2012) ศึกษาถึงผลกระทบของระดับการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับ 15% และ 30% ต่อความถี่และแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย แต่ผลงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในระบบจำหน่ายแบบสามเฟสสมดุล ส่วนการหาผลกระทบของพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะระบบผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสที่พิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกระจายในระบบและมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ยังไม่ปรากฏให้เห็นในผลงานวิจัย

## 2.4 สรุป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

2.4.1 ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าจากการเพิ่มระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส ซึ่งสามารถนำไปกำหนดนโยบาย วางแผนการดำเนินงานต่างๆ และหาวิธีการป้องกัน ในกรณีที่มีการสนับสนุนให้มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มเข้าสู่ระบบจำหน่ายมากขึ้น

2.4.2 ทำให้สามารถประเมินได้ว่ากำลังผลิตติดตั้งจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ควรมีค่ามากน้อยเท่าไรโดยพิจารณาถึงผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเดิม และยังสามารถนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.3 เพื่อนำผลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้บูรณาการกับการเรียนการสอนในวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (EEG452) รวมถึงการหามาตรฐานหรือข้อกำหนดต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบไฟฟ้า

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบการวิจัยหรือแบบแผนการวิจัย

##### แบบแผนทางการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณวิธีการตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย
3. ทดสอบ วิเคราะห์และประเมินผล ตามหลักวิชาการ

#### 3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ทดสอบวิธีการกับระบบจำหน่ายมัลติเฟสมาตรฐาน IEEE 34 Node Test Feeder

#### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

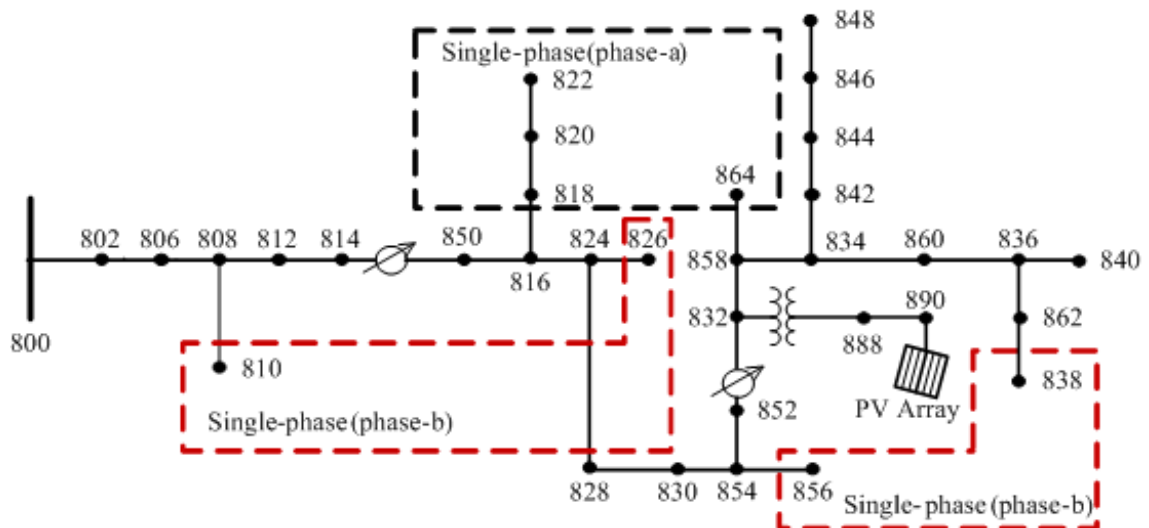
1. ศึกษาผลงานทางวิชาการในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ศึกษาวิจัย
2. สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา
3. สร้างแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสที่มีการติดตั้งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่ระดับการผลิตต่างๆ
4. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทดสอบวิธีการที่ได้นำเสนอ
5. กำหนดกรณีศึกษา และทดสอบโปรแกรมกับระบบจำหน่ายมัลติเฟสมาตรฐาน IEEE 34 Node Test Feeder
6. วิเคราะห์ และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ
7. เรียบเรียงเอกสารเพื่อจัดทำรายงานวิจัย

### 3.4 เครื่องมือการวิจัย

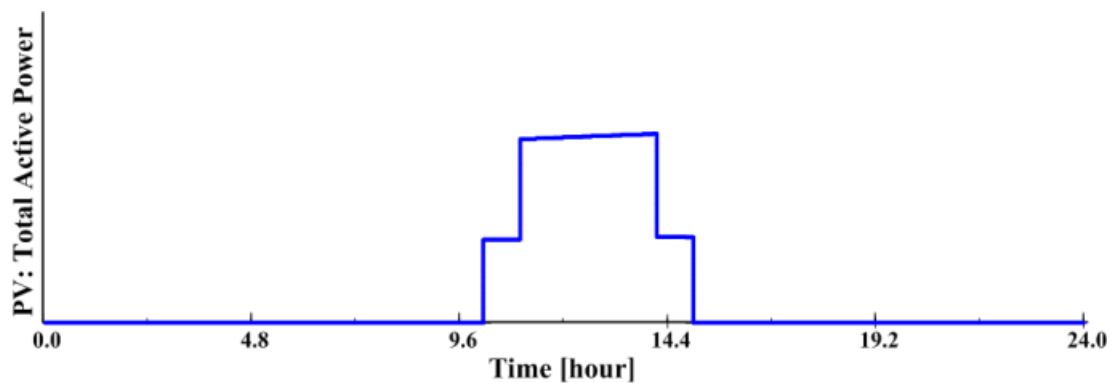
เครื่องมือการวิจัยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม DiGSILENT PowerFactory software โดยมีรายละเอียดตามภาคผนวก ข. มาใช้ในการวิเคราะห์แบบสแตติกและไดนามิก ส่วนข้อมูลของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส IEEE 34 node test feeder อยู่ในภาคผนวก โดยระบบทดสอบมาตรฐาน จะใช้ระบบทดสอบมาตรฐานและระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา และระบบทดสอบมาตรฐานและระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา ส่วนการหาค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าจะใช้โฟลว์ชาร์ทขั้นตอนสำหรับการหาค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า

#### 3.4.1 ระบบทดสอบมาตรฐานและระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา

ระบบทดสอบมาตรฐานที่จะใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบทความนี้คือระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส IEEE 34 node test feeder (Jason Fuller, 2013) ดังแสดงในภาพประกอบ 3. โดยระบบจะมีส่วนที่เป็นหนึ่งเฟสและสามเฟสอยู่ด้วยกัน และมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบสามเฟสที่บัส 844 และบัส 848 นอกจากนี้ยังมีโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ (Voltage regulator) เชื่อมต่อระหว่างบัส 814 กับบัส 850 และระหว่างบัส 832 กับบัส 852 โดยตั้งค่าการควบคุมที่เฟส b-c ในกรณีฐาน (Base case) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 890 จะมีค่าต่ำกว่าขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95 เปอรเซ็นต์ เพราะว่าสายที่เชื่อมต่อจากบัส 888 ไปยังบัส 890 มีความยาวค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสอื่นๆ อยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าทั้งหมด ส่วนรูปแบบกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาใน 1 วัน สามารถแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 3 ระบบจำหน่ายแบบมัดติเฟส IEEE 34 node test feeder โดยติดตั้ง PV ที่บัส 890



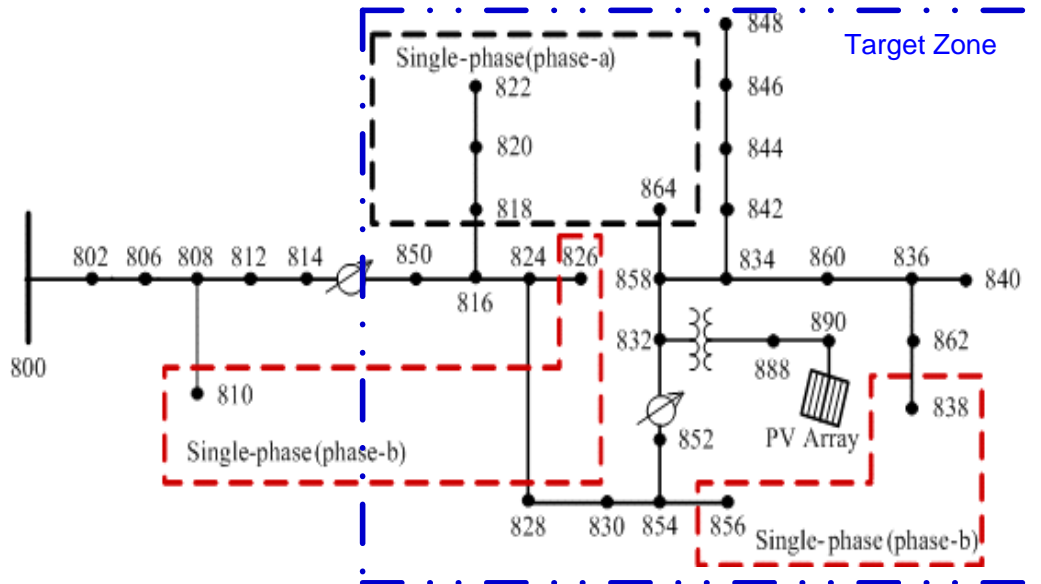
ภาพประกอบ 4 กำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา

### 3.4.2 ระบบทดสอบมาตรฐานและระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาร์ทพุท

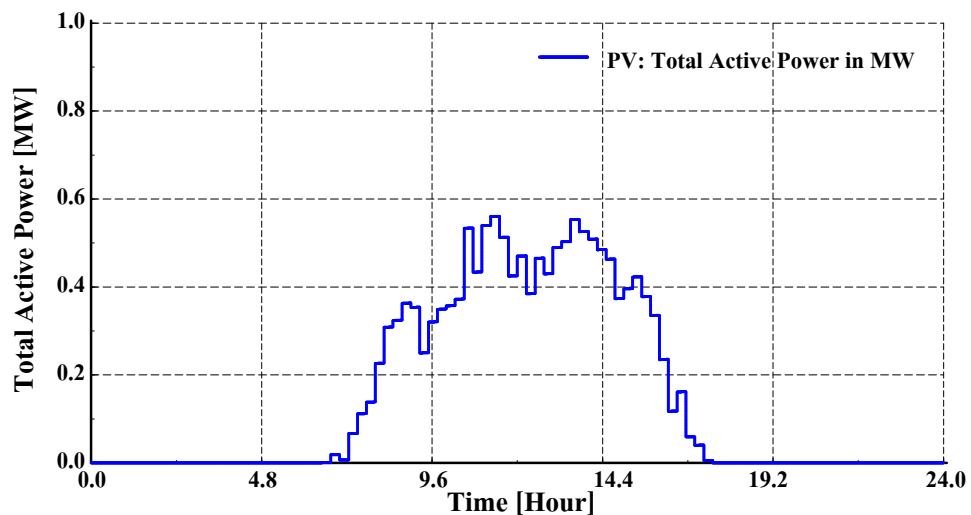
ระบบทดสอบมาตรฐานที่จะใช้ในการวิเคราะห์คือระบบจำหน่ายแบบมัดติเฟส IEEE 34 node test feeder (Jason Fuller, 2013) ดังแสดงในภาพประกอบ 5. โดยระบบจะมีส่วนที่เป็นหนึ่งเฟสและสามเฟสอยู่ด้วยกัน และมีการกำหนดโซนเป้าหมาย (Target zone) สำหรับใช้ในการพิจารณาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทุกบัสภายในโซนว่าอยู่ในขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ส่วนรูปแบบกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาร์ทพุท สามารถแสดงในภาพประกอบ 6 ซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการเก็บ



ข้อมูลวันที่ 5 เมษายน 2557 โดยเก็บค่าทุกๆ 15 นาที จากโซล่าฟาร์มที่มีกำลังผลิตติดตั้งขนาด 1 MWp ที่บริเวณแห่งหนึ่งในประเทศไทย โดยค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าเกิดในช่วงเช้าที่เวลา 11:15



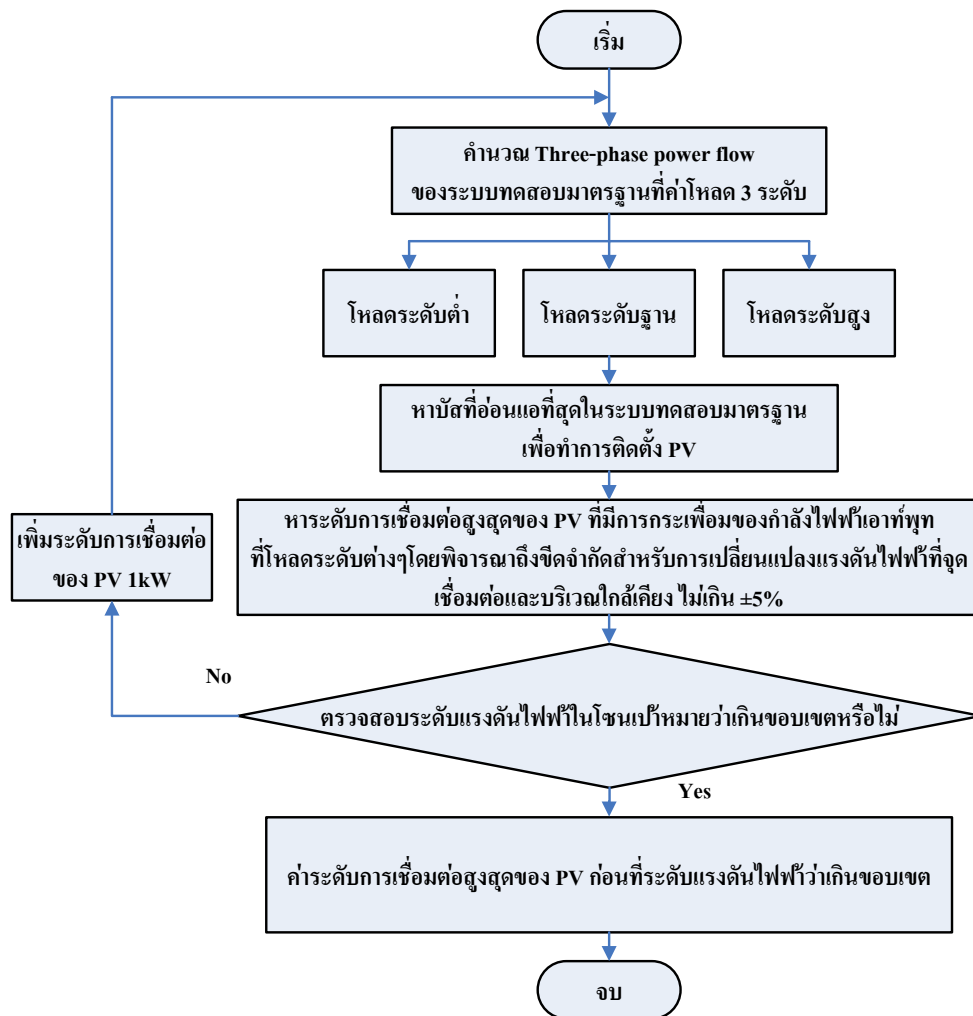
ภาพประกอบ 5 ระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส IEEE 34 node test feeder ที่มีการกำหนดโซนเป้าหมายสำหรับพิจารณาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสภายในโซน



ภาพประกอบ 6 กำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ใน 24 ชั่วโมงที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท จากกำลังผลิตติดตั้งขนาด 1MWp

### 3.4.3 โพลีชาร์ทขั้นตอนสำหรับการหาค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอขั้นตอนการหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ดังแสดงในภาพประกอบ 7 เริ่มจากคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสที่ค่าค่าไหล 3 ระดับคือ ไหลระดับต่ำ ไหลระดับฐาน และไหลระดับสูง ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบโดยใช้ดัชนีวีอาร์ไอ เพื่อทำการหาระดับการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สูงสุดโดยสมมุติว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ และพิจารณาถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ที่จุดเชื่อมต่อและบริเวณใกล้เคียง ขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสอยู่ในขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปอรเซ็นต์ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไดนามิก เพื่อหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท



ภาพประกอบ 7 โพลีชาร์ทขั้นตอนสำหรับการหาค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า

### 3.5 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการทำวิจัยสามารถรวบรวมได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

กระทำโดยพิจารณาผลที่ได้จากการทดสอบในกรณีศึกษาต่างๆ ซึ่งต้องใช้ความรู้ตามหลักวิชาการประกอบการวิเคราะห์ ทั้งนี้อาจเปรียบเทียบผลหรือคุณแนวโน้มของผลทดสอบในบางกรณีที่สอดคล้องกันกับงานวิจัยอื่นที่มีผู้เสนอไว้

## บทที่ 4

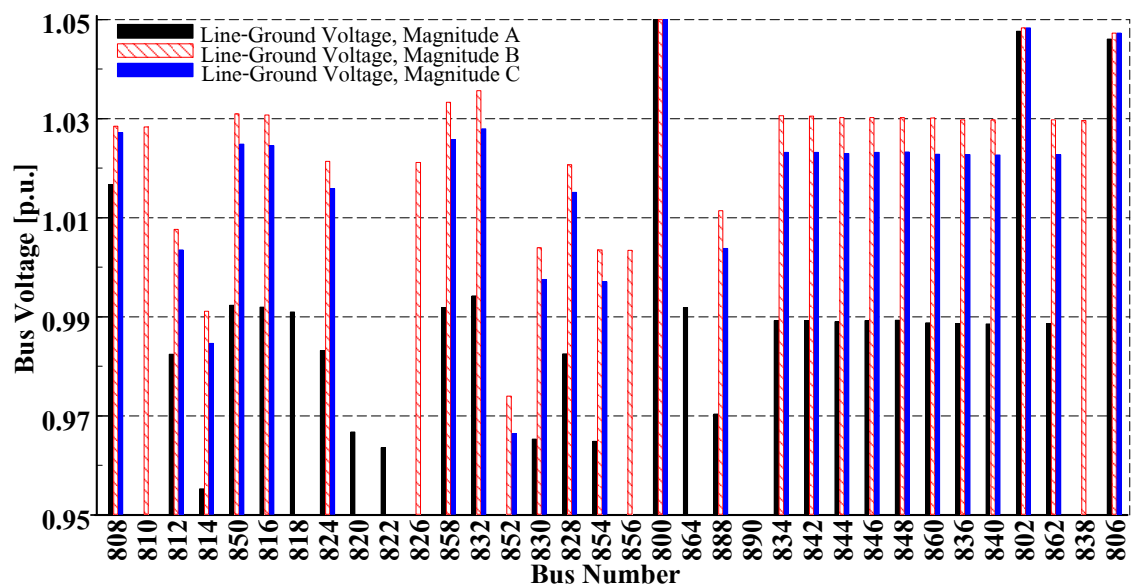
### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามปัญหาการวิจัย

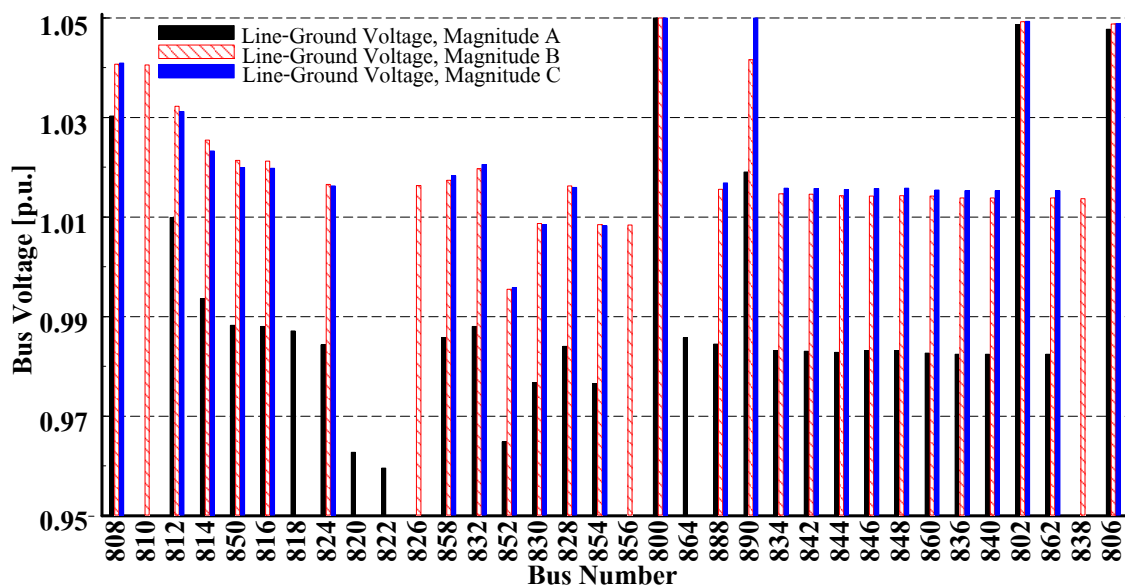
การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นสองส่วน คือ การวิเคราะห์แบบสแตติกและไดนามิก โดยการวิเคราะห์แบบสแตติกมีวัตถุประสงค์เพื่อหาข้อที่อ่อนแอที่สุดในระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 node test feeder สำหรับติดตั้ง PV และหาผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสีย โหลดดึงแพคเตอร์สูงสุด และเปอร์เซ็นต์แพคเตอร์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า แล้วทำการเพิ่มระดับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ค่าความสูญเสียของกริด และขอบเขตของเสถียรภาพแรงดัน ขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปอรืยูนิต ส่วนการวิเคราะห์แบบไดนามิกจะพิจารณาถึงขนาดของ PV ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบสแตติก เพื่อหาผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา ผลที่ได้จากการศึกษายังสามารถนำมาหาข้อกำหนดหรือทำเป็นมาตรฐานในการเชื่อมต่อพลังงานหมุนเวียน

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนการหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส โดยการวิเคราะห์จะแบ่งเป็นเป็นสองส่วน คือ แบบสแตติกและไดนามิก โดยการวิเคราะห์แบบสแตติกเป็นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส (Three-phase power flow) เพื่อหาค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีทีระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ ส่วนการวิเคราะห์แบบไดนามิกเป็นการหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท สำหรับค่าโหลดสามระดับคือ โหลดระดับต่ำ (คิดที่ 50% ของโหลดระดับฐาน) โหลดระดับฐาน (ใช้ค่าโหลดที่ได้จากระบบทดสอบมาตรฐาน (Jason Fuller, 2013) ) และโหลดระดับสูงสุด (คิดที่ 200% ของโหลดระดับฐาน) ขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสต้องอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปอรืยูนิต และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไดนามิก เพื่อให้ทราบถึงขีดความสามารถจริงๆของระบบ ที่ยังคงสามารถรับการเชื่อมต่อจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างๆได้

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบแบบสแตติกของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส ด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory เพื่อติดตั้ง PV ที่จำลองแบบโหลดติดลบ (Negative load) ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด ที่บัส 890 ดังแสดงในภาพประกอบ 3. โดยที่ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 890 ทั้งสามเฟส จะมีค่าต่ำกว่าขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95 เปรอร์ยูนิต ดังแสดงในภาพประกอบ 8. จากนั้นทำการเพิ่มระดับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่บัส 890 โดยค่าสูงสุดของ PV ที่สามารถเพิ่มขึ้นได้คือ 848 kW โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทุกบัสอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า 0.95-1.05 เปรอร์ยูนิต ดังแสดงในภาพประกอบ 9. ถ้ามีการเพิ่มขนาดของ PV ที่บัส 890 ไปมากกว่า 848 kW ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของเฟส c ที่บัส 890 จะเกิดแรงดันเกิน 1.05 เปรอร์ยูนิตก่อนบัสอื่นๆ ส่วนผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสีย โหลดดึงแพคเตอร์สูงสุด และเปอร์เซ็นต์แพคเตอร์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า ของแต่ละกรณี สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 1.



ภาพประกอบ 8 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแต่ละบัสของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสมาตรฐาน

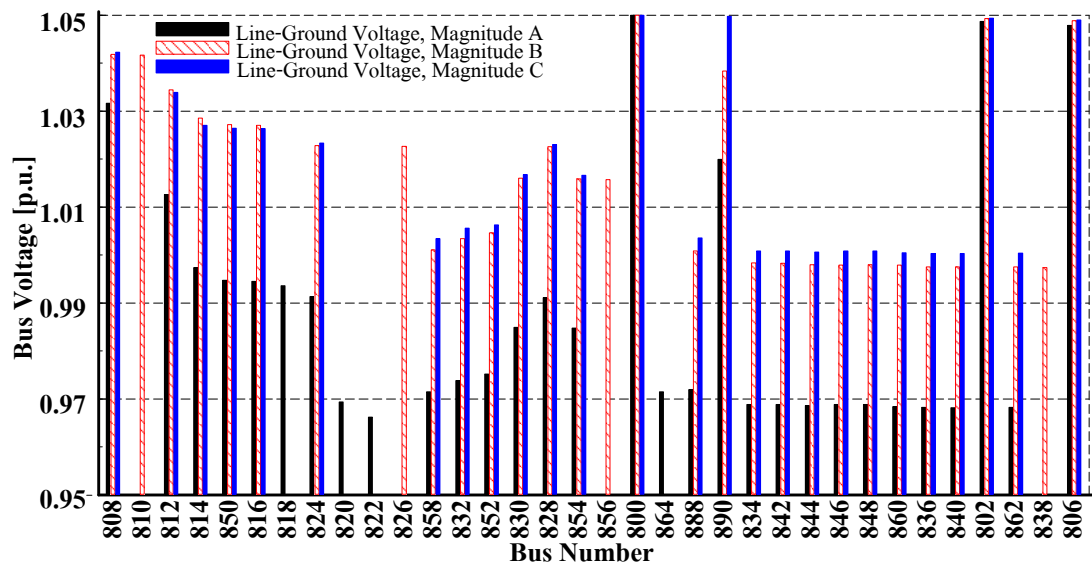


ภาพประกอบ 9 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสหลังจากติดตั้ง PV ขนาด 848 kW

ตารางที่ 1 ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีต่างๆ

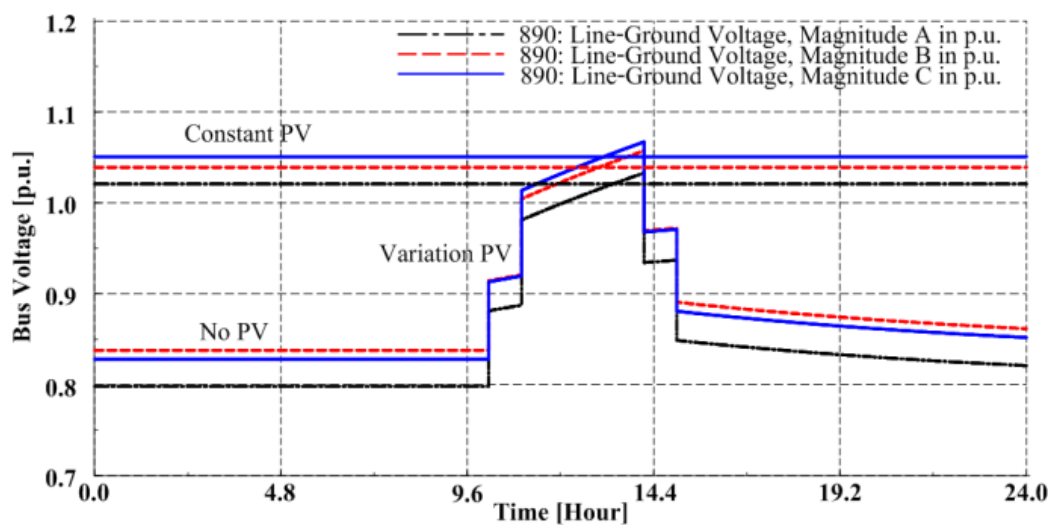
Case	Loss [MW]	ALR [%]	MLF	VUF [%]
With regulators	0.2621	-	2.374	1.6066
Regulators with PV 450kW	0.1256	52.07	2.913	1.1227
Regulators with PV 848kW	0.0913	65.16	3.431	0.7537
Without regulators	0.2284	-	1.895	1.4277
No regulators with PV 949kW	0.0961	63.33	3.207	0.6430

ในกรณีที่ไม่มีคิดผลของโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ ค่าสูงสุดของ PV ที่สามารถเพิ่มขึ้นได้คือ 949 kW โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทุกบัสยังอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบ 10.



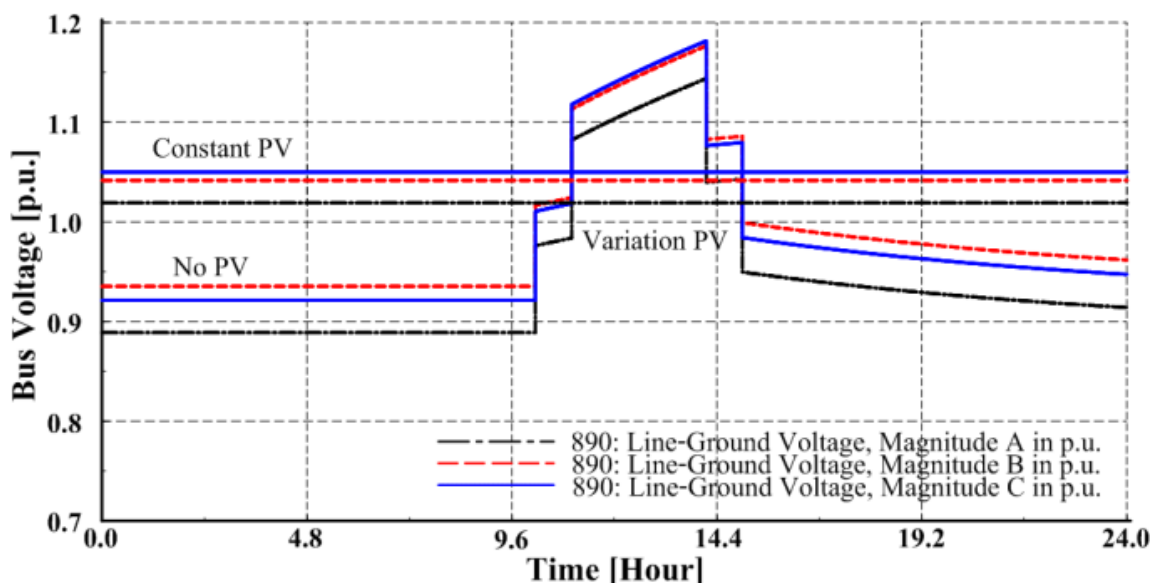
ภาพประกอบ 10 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแต่ละบัสหลังจากติดตั้ง PV ขนาด 949 kW

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำผลที่ได้จากสแตติกมาวิเคราะห์แบบไดนามิก เพื่อหาผลกระทบของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาดังในภาพประกอบ 4. ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีที่ไม่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ผลของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา (ค่ายอดสูงสุดของภาพประกอบ 4. เท่ากับ 949 kWp ) ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ไม่อยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า เช่น ที่เวลา 14.25 ชั่วโมง หรือ 50,940 วินาที ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่บัส 890 เฟส c มีค่าเท่ากับ 1.0669 เฮอร์ยูนิต ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเกินกว่าขอบเขตของค่าที่กำหนดไป 1.61% ดังแสดงในภาพประกอบ 11.



ภาพประกอบ 11 ผลของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาต่อระดับแรงดันที่บัส 890 ของระบบมัลติเฟสที่ไม่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์

และในกรณีที่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ผลของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา (ค่ายอดสูงสุดที่ 848 kWp) ระดับแรงดันสูงสุดเกิดขึ้นที่เวลา 50,940 วินาที โดยค่าระดับแรงดัน ไฟฟ้าที่บัส 890 เฟส c มีค่าเท่ากับ 1.1815 เพอร์ยูนิต ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าเกินขอบเขตไปถึง 12.52% ดังแสดงในภาพประกอบ 12.



ภาพประกอบ 12 ผลของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาต่อระดับแรงดันที่บัส 890 ของระบบมัลติเฟสที่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

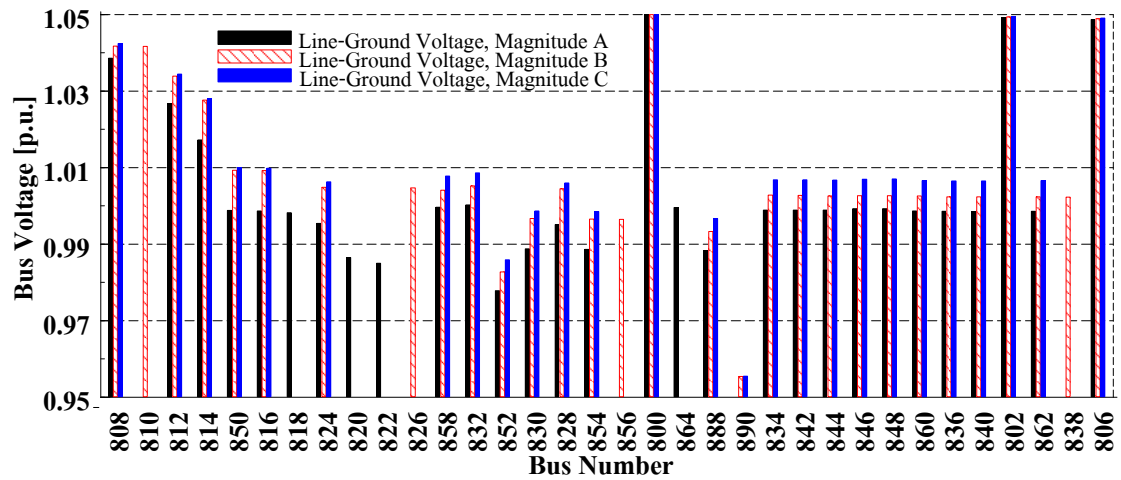
งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอขั้นตอนการหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบ โดยระบบทดสอบมาตรฐานที่จะใช้ในการวิเคราะห์คือระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส IEEE 34 node test feeder (Jason Fuller, 2013) ดังแสดงในภาพประกอบ 5. ซึ่งมีการกำหนดโซนเป้าหมาย (Target zone) สำหรับใช้ในการพิจารณาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทุกบัสภายในโซนว่าอยู่ในขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ส่วนรูปแบบกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท สามารถแสดงในภาพประกอบ 6



เมื่อทำการวิเคราะห์แบบสแตติก ด้วยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory และจากการใช้ดัชนีวีอาร์ไอ พบว่าบัสที่มีค่าดัชนีต่ำที่สุดคือบัส 890 (P. Juanuwattanakul, and M.A.S. Masoum, 2012: 1262-1271) ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ และเป็นบัสที่ดีที่สุดสำหรับติดตั้ง PV จากนั้นทำการเพิ่มระดับการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่บัส 890 ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ที่ค่าโหลดระดับต่างๆ สามระดับ ซึ่งค่าสูงสุดของ PV ที่สามารถเพิ่มขึ้นได้สำหรับโหลดระดับต่ำ ระดับฐาน และระดับสูง คือ 613 kW 848 kW และ 1240kW ตามลำดับ หากเพิ่มค่าระดับการเชื่อมต่ออีก 1 kW บัสที่อยู่ในโซนเป้าหมายของภาพประกอบ 5. ที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเกินขอบเขตของโหลดแต่ละระดับสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2. โดยค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสสำหรับโหลดระดับต่ำก่อนติดตั้ง PV ที่บัส 890 สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 13. เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ แบบไดนามิก เพื่อหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตดังในภาพประกอบ 6. ที่ค่าโหลด 3 ระดับคือ โหลดระดับต่ำ โหลดระดับฐาน และโหลดระดับสูงพบว่าค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดที่โหลดระดับต่ำลดลงเหลือ 255 kW โดยบัสเป้าหมายแรกที่มีค่าแรงดันเกินคือบัส 832 เฟส C เกิดที่เวลา 15:30 แทนที่จะเป็นบัส 890 เฟส C ดังแสดงในภาพประกอบ 14. ส่วนที่โหลดระดับฐาน ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดที่โหลดระดับฐานลดลงเหลือ 108 kW โดยบัสเป้าหมายแรกที่มีค่าแรงดันเกินคือบัส 832 เฟส B เกิดที่เวลา 14:15 ดังแสดงในภาพประกอบ 15. และที่โหลดระดับสูง ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดที่โหลดระดับสูงลดลงเหลือ 1182 kW โดยบัสเป้าหมายแรกที่มีค่าแรงดันเกินคือบัส 850 เฟส B เกิดที่เวลา 14:15 ดังแสดงในภาพประกอบ 16. และค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีที่ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่โหลดระดับต่างๆสามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 3.

**ตารางที่ 2** ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีค่าคงที่

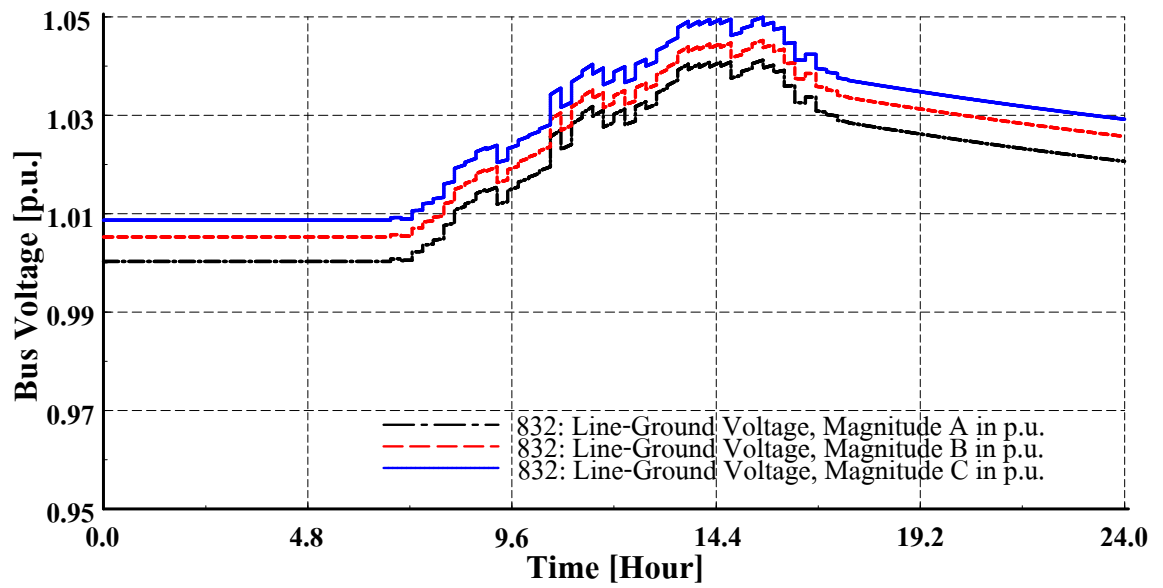
โหลด	ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุด [kW]	บัสเป้าหมายแรกที่มีค่าแรงดันเกิน
ระดับต่ำ	613	890 เฟส C
ระดับฐาน	848	890 เฟส C
ระดับสูง	1240	832 เฟส B



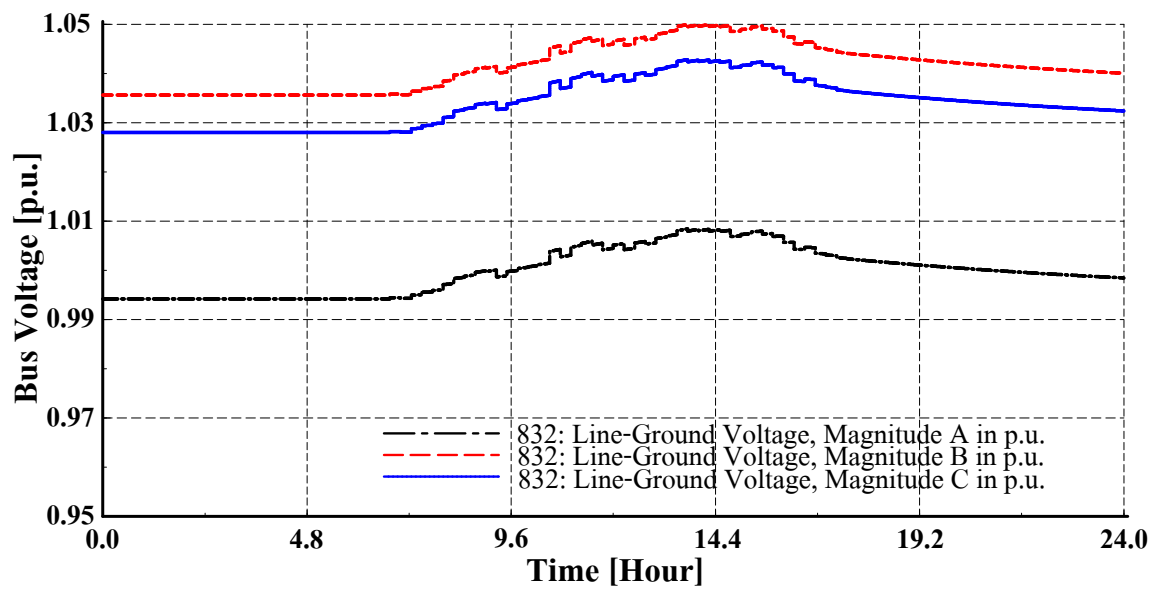
ภาพประกอบ 13 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัส ที่โหลดระดับต่ำก่อนที่จะติดตั้ง PV

ตารางที่ 3 ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีที่มีภาระเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเอาร์ทพุท

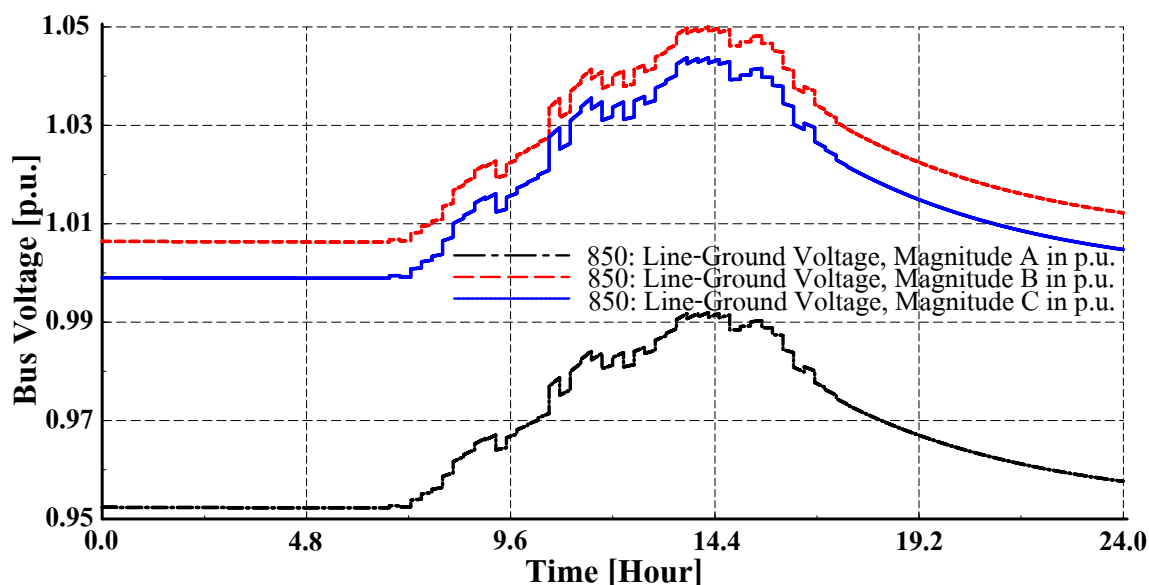
โหลด	ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุด [kW]	บัสเป้าหมายแรก ที่มีค่าแรงดันเกิน	เวลา [Second]
ระดับต่ำ	255	832 เฟส C [ภาพประกอบ 4.]	55800 หรือ 15:30
ระดับฐาน	108	832 เฟส B [ภาพประกอบ 5.]	51300 หรือ 14:15
ระดับสูง	1182	850 เฟส B [ภาพประกอบ 6.]	51300 หรือ 14:15



ภาพประกอบ 14 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 832 ที่โหลดระดับต่ำ



ภาพประกอบ 15 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 832 ที่โหลดระดับฐาน

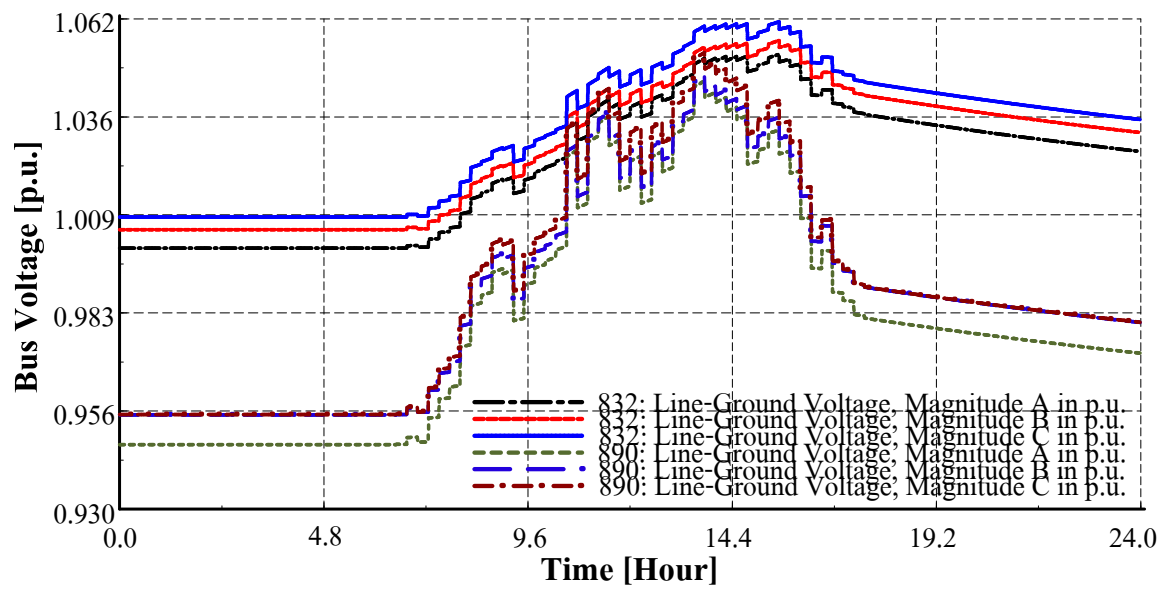


ภาพประกอบ 16 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 850 ที่โหลดระดับสูง

ถ้าหากพิจารณาขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่บัส 890 (บัสที่เชื่อมต่อกับ PV) เป็นหลักโดยไม่คำนึงถึงขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป้าหมาย สำหรับโหลดระดับต่ำ ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 832 เฟส C จะมีค่าแรงดันเกินเป็น 1.0601 คิดเป็น 0.97% ดังแสดงในตารางที่ 4. และภาพประกอบ 17.

ตารางที่ 4 ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในกรณีที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต โดยพิจารณาขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่บัส 890

โหลด	ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุดที่บัส 890 [kW] และค่าแรงดันไฟฟ้า[p.u.]	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป้าหมายที่มีค่าแรงดันเกิน [p.u.]	เวลา [Second]
ระดับต่ำ	320 (1.0499)	832 เฟส C (1.0601)	50400 หรือ 14:00
ระดับฐาน	441 (1.0499)	832 เฟส B (1.0970)	49500 หรือ 13:45
ระดับสูง	1825 (1.0500)	850 เฟส B (1.0971)	49500 หรือ 13:45



ภาพประกอบ 17 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส บัส 890 และ 832 โดยพิจารณาขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่บัส 890 เป็นหลัก

## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสทั้งทางด้านสแตติกและไดนามิก โดยจำลองสถานการณ์แบบสแตติกของระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟสเพื่อทำการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ แล้วทำการเพิ่มระดับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสอยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์แบบไดนามิก เพื่อหาผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส นอกจากนี้ยังได้นำเสนอขั้นตอนการหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยใช้ข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ของโซล่าฟาร์มแห่งหนึ่งในประเทศไทย เพื่อหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าเอพท์พูท ที่ค่าโหลด 3 ระดับคือ โหลดระดับต่ำ โหลดระดับฐาน และโหลดระดับสูง

#### 5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์แบบสแตติกเพื่อหาขนาดสูงสุดของ PV ที่สามารถติดตั้ง ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส โดยที่ระดับแรงดันอยู่ในขอบเขตที่กำหนด แล้วนำมาวิเคราะห์แบบไดนามิกเพื่อหาผลกระทบของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส จากการศึกษาพบว่าผลของ PV ที่มีค่าคงที่ ระดับแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ในขอบเขตเหมือนกับการวิเคราะห์แบบสแตติก สำหรับ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาในกรณีที่ไม่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานไปเล็กน้อย ส่วนในกรณีที่คิดผลของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์นั้น ระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อจะมีค่าเกินกว่าขอบเขตของค่ามาตรฐานไปมาก

การเพิ่มระดับการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีค่าคงที่ ที่ค่าโหลดระดับต่างๆ ถึงจุดหนึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบ และในกรณีที่เพิ่มระดับการเชื่อมต่อจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้า ค่าระดับการเชื่อมต่อสูงสุด

ของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์จะมีค่าลดลง โดยลดลงมากที่สุดที่ค่าโหลระดับฐาน ส่วนการเพิ่มระดับการเชื่อมต่อจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ โดยพิจารณาขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ติดตั้ง ตรงตามมาตรฐานในการเชื่อมต่อก็สามารถทำให้แรงดันที่บัสอื่นๆ เกินกว่ามาตรฐานได้

### 5.3 อภิปรายผล

ผลที่ได้จากการศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ยังสามารถนำไปใช้ในการวางแผนและการดำเนินงานต่างๆ ทางระบบไฟฟ้ากำลังได้ โดยเฉพาะในอนาคตอันใกล้ การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อการทำงาน ก็สามารถนำวิธีการที่ได้นำเสนอขั้นตอนการหาระดับการเชื่อมต่อสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยพิจารณาถึงการระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย มาใช้ประเมินระดับการติดตั้งที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่าย

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลามาใช้ในการวิเคราะห์ แต่ข้อมูลของโหลยังเป็นแบบคงที่สามระดับ ระดับต่ำ ระดับฐาน และระดับสูง แนวทางในการพัฒนาต่อไปคือนำข้อมูล PV generation profile และความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา มาศึกษาผลกระทบและหาวิธีการแก้ไขต่อไป

บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- ภรชัย จุณวัฒน์นกุล กীরติ ชยะกุลคีรี และ นิमित บุญภิรมย์ 2556. ผลกระทบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายแบบมัลติเฟส. **ในรายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36.**
- สุธาสินี โพธิ์อ่อน, คมสันต์ หงษ์สมบัติ และ วิชัย สุระพัฒน์. 2554. การพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าระยะสั้นในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ. **ในรายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34.**
- DigSILENT, **PowerFactory Manual**, 14.0 ed., 2009.
- Jason Fuller, (2013). **Distribution Test Feeders**, August 05, 2013, from <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>
- J. Morren, S.W.H. de Haan, Maximum penetration level of distributed generation without violating voltage limits, **IET-CIRED**, pp.1-4, 23-24 June 2008.
- L. Chia-Hung, H. Wei-Lin, C. Chao-Shun, H. Cheng-Ting and Te-Tien Ku, Optimization of Photovoltaic Penetration in Distribution Systems Considering Annual Duration Curve of Solar Irradiation, **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.27, no.2, pp.1090-1097, May 2012
- M. E. Baran, H. Hooshyar, S. Zhan and A. Huang, Accommodating High PV Penetration on Distribution Feeders, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol.3, no.2, pp.1039-1046, June 2012
- M. E. Baran, H. Hooshyar, Z. Shen, J. Gajda and K. M. M. Huq, Impact of High Penetration Residential PV Systems on Distribution Systems, **Power and Energy Society General Meeting 2011, IEEE Conference Publication** , pp. 1-5.
- P. Juanwattanukul, and M.A.S. Masoum, Increasing distributed generation penetration in multiphase distribution networks considering grid losses, maximum loading factor and bus voltage limits, **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol.6, no.12, December 2012, pp.1262-1271.
- R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, and H.W. Beaty, **Electrical Power Systems Quality**, McGraw-Hill, 1996.

S. A. Pourmousavi, A. S. Cifala, M. H. Nehrir, Impact of high penetration of PV generation on frequency and voltage in a distribution feeder, **North American Power Symposium (NAPS)**, 2012 , vol., no., pp.1-8.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลจำเพาะของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 บัส

### ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 บัส

#### ตารางข้อมูลของสายส่ง

Node A	Node B	Length(ft.)	Configuration
800	802	2580	300
802	806	1730	300
806	808	32230	300
808	810	5804	303
808	812	37500	300
812	814	29730	300
814	850	10	301
816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303
824	828	840	301
828	830	20440	301
830	854	520	301
832	858	4900	301
832	888	0	XFM-1
834	860	2020	301

Node A	Node B	Length(ft.)	Configuration
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	303
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

ตารางข้อมูลโครงสร้างของสายส่งเหนือดิน

Configuration	Phasing	Phase	Neutral	Spacing ID
		ACSR	ACSR	

Configuration	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
				ID
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

ตารางข้อมูลหม้อแปลง

	kVA	kV-high	kV-low	R %	X %
Substation	2500	69 - D	24.9 -Gr. W	1	8
XFM -1	500	24.9 - Gr.W	4.16 - Gr. W	1.9	4.08

ตารางข้อมูลโหลดที่บัส

	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16

890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

ตารางข้อมูลตัวเก็บประจุ

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVAr	kVAr	kVAr
844	100	100	100
848	150	150	150
Total	250	250	250

ตารางข้อมูลโหลดที่กระจายระหว่างบัส

Node	Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
A	B	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0



Node	Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0
Total			262	133	240	120	220	114

ตารางข้อมูลของเรกูเลเตอร์

Regulator ID	1		
Line Segment	814 - 850		
Location	814		
Phases	A - B -C		
Connection	3-Ph,LG		
Monitoring Phase	A-B-C		
Bandwidth	2.0 volts		
PT Ratio	120		
Primary CT Rating	100		
Compensator Settings	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R - Setting	2.7	2.7	2.7
X - Setting	1.6	1.6	1.6
Voltage Level	122	122	122
Regulator ID	2		
Line Segment	852 - 832		
Location	852		
Phases	A - B -C		
Connection	3-Ph,LG		

Monitoring Phase	A-B-C		
Bandwidth	2.0 volts		
PT Ratio	120		
Primary CT Rating	100		
Compensator Settings	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R - Setting	2.5	2.5	2.5
X - Setting	1.5	1.5	1.5
Voltage Level	124	124	124

ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างระบบส่งชนิดต่างๆ

### Configuration 300

Z (R +jX) in ohms per mile

1.3368 1.3343 0.2101 0.5779 0.2130 0.5015

1.3238 1.3569 0.2066 0.4591

1.3294 1.3471

B in micro Siemens per mile

5.3350 -1.5313 -0.9943

5.0979 -0.6212

4.8880

**Configuration 301**

Z (R +jX) in ohms per mile

1.9300 1.4115 0.2327 0.6442 0.2359 0.5691

1.9157 1.4281 0.2288 0.5238

1.9219 1.4209

B in micro Siemens per mile

5.1207 -1.4364 -0.9402

4.9055 -0.5951

4.7154

**Configuration 302**

Z (R +jX) in ohms per mile

2.7995 1.4855 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

B in micro Siemens per mile

4.2251 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

0.0000

**Configuration 303**

Z (R +jX) in ohms per mile

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

2.7995 1.4855 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

B in micro Siemens per mile

0.0000 0.0000 0.0000

4.2251 0.0000

0.0000

**Configuration 304**

Z (R +jX) in ohms per mile

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

1.9217 1.4212 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

B in micro Siemens per mile

0.0000 0.0000 0.0000

4.3637 0.0000

0.0000

ภาคผนวก ข.

ตารางค่าระดับการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

**ตารางค่าระดับการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์**

เวลา	ค่า PV.	คิดเป็น %
0.00	0	0.000
0.15	0	0.000
0.30	0	0.000
0.45	0	0.000
1.00	0	0.000
1.15	0	0.000
1.30	0	0.000
1.45	0	0.000
2.00	0	0.000
2.15	0	0.000
2.30	0	0.000
2.45	0	0.000
3.00	0	0.000
3.15	0	0.000
3.30	0	0.000
3.45	0	0.000
4.00	0	0.000
4.15	0	0.000
4.30	0	0.000
4.45	0	0.000
5.00	0	0.000
5.15	0	0.000
5.30	0	0.000
5.45	0	0.000
6.00	0	0.000
6.15	0	0.000

เวลา	ค่า PV.	คิดเป็น %
6.30	0.73	0.124
6.45	16.91	2.874
7.00	6	1.020
7.15	61.4	10.437
7.30	103	17.508
7.45	127.83	21.728
8.00	214.93	36.533
8.15	300.55	51.087
8.30	316.51	53.800
8.45	358.89	61.004
9.00	347.39	59.049
9.15	235.82	40.084
9.30	308.63	52.460
9.45	339.38	57.687
10.00	346.96	58.976
10.15	362.61	61.636
10.30	554.54	94.260
10.45	431.93	73.419
11.00	561.22	95.395
11.15	588.31	100.000
11.30	526.74	89.534
11.45	420.49	71.474
12.00	473.08	80.413
12.15	373.52	63.490
12.30	465.34	79.098
12.45	423.28	71.948
13.00	493.01	83.801
13.15	508.75	86.477



เวลา	ค่า PV.	คิดเป็น %
13.30	571.28	97.105
13.45	536.64	91.217
14.00	515.04	87.546
14.15	485.42	82.511
14.30	459.22	78.057
14.45	357.1	60.699
15.00	380.49	64.675
15.15	409.76	69.650
15.30	359.48	61.104
15.45	312.75	53.161
16.00	211.26	35.910
16.15	101.39	17.234
16.30	140.41	23.867
16.45	49.66	8.441
17.00	33.51	5.696
17.15	4.88	0.829
17.30	0	0.000
17.45	0	0.000
18.00	0	0.000
18.15	0	0.000
18.30	0	0.000
18.45	0	0.000
19.00	0	0.000
19.15	0	0.000
19.30	0	0.000
19.45	0	0.000
20.00	0	0.000
20.15	0	0.000

เวลา	ค่า PV.	คิดเป็น %
20.30	0	0.000
20.45	0	0.000
21.00	0	0.000
21.15	0	0.000
21.30	0	0.000
21.45	0	0.000
22.00	0	0.000
22.15	0	0.000
22.30	0	0.000
22.45	0	0.000
23.00	0	0.000
23.15	0	0.000
23.30	0	0.000
23.45	0	0.000
24.00	0	0.000

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายภรชัย จุณนวัฒน์นกุล
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 3 สิงหาคม 2514
สถานที่เกิด	อำเภอเบตง จังหวัดยะลา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 60/333 ถนนรามอินทรา ซอยรามอินทรา40แยก33 แขวงนวลจันทร์ เขตบึงกุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10230
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม วิทยาเขตบางเขน
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2537 วศบ. จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พ.ศ. 2541 วศม. จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2555 Ph.D. from Curtin University