

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง
ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
Voltage Stability Analysis of Grid-Connected PV Power System

โดย

นายธนพนธ์	จิระพิบูลย์พันธ์
นางสาวธนาภา	เกตุรัตน์กุล
นายธวัชชัย	เรืองรอง
นายธวัชชัย	วสุรารัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง
ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Voltage Stability Analysis of Grid-Connected PV Power System

โดย

นายธนพนธ์ จิระพิบูลย์พันธ์

นางสาวธนาภา เกตุรัตน์กุล

นายธวัชชัย เรืองรอง

นายธวัชชัย วสุรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

Voltage Stability Analysis of Grid-Connected PV Power System

THANAPON JILAPIBOONPAN

THANAPA GATERATANAKUL

THAWATCHAI RUANGRONG

TAVATCHAI VASOOTARAT

A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

ปีการศึกษา 2557

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง

ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Voltage Stability Analysis of Grid-Connected PV Power System

โดย

นายธนพนธ์	จิระพิบูลย์พันธ์
นางสาวธนาภา	เกตุรัตน์กุล
นายรัชชัย	เรืองรอง
นายรัชชัย	วสุธรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วรุตม์ สุอำพัน

ปริญญาโทปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

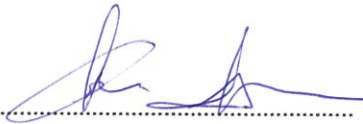
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง

ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ

- | | |
|----------------|------------------|
| 1. นายธนพนธ์ | จิระพิบูลย์พันธ์ |
| 2. นางสาวธนาภา | เกตุรัตน์กุล |
| 3. นายธวัชชัย | เรืองรอง |
| 4. นายธวัชชัย | วสุธรัตน์ |


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.วรุตม์ สุอำพัน)

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง
ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

นายธนพนธ์ จิระพิบูลย์พันธ์
นางสาวธนาภา เกตุรัตน์กุล
นายธวัชชัย เรืองรอง
นายธวัชชัย วสุธารัตน์
ดร.วรุฒม์ สุอำพัน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

เนื่องจากนโยบายการใช้พลังงานของประเทศไทยแผนปัจจุบัน PDP 2010 ที่เน้นไปทางพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีศักยภาพในด้านพลังงานสูงที่สุด การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งสำคัญและหลีกเลี่ยงไม่ได้ในอนาคต ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งชนิดของเสถียรภาพที่ทำการวิเคราะห์คือเสถียรภาพของแรงดัน เนื่องจากมีผลต่อระบบมากที่สุด โครงการนี้เลือกใช้วิธีนิวตัน ราฟสันและวิธี CPFLOW ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อช่วยทำการศึกษาเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเงื่อนไขด้านองค์ประกอบต่างกัน เช่น ลักษณะของโหลด ปริมาณของโหลดและชนิดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบอีกด้วย

Voltage Stability Analysis of Grid-Connected PV Power System

Mr. Thanapon	Jilapiboonpan	
Miss Thanapa	Gateratanakul	
Mr. Thawatchai	Ruangrong	
Mr. Tavatchai	Vasootarat	
Dr. Warut	Suampun	Supervisor

ABSTRACT

According to the current Power Development Plan (PDP 2010) of Thailand, the future of domestic electrical energy production in the next twenty years will focus more on renewable energy especially solar energy which has the highest potential in the country. Therefore a complete understanding of the effects caused by solar electricity generating system is very crucial and inevitable.

This thesis emphasizes on the study of voltage stability which is one of the most important aspects in power system. Based on Newton-Raphson method and Continuation power flow (CPFLOW) technique, we developed a simulation program which can effectively generate PV curves of grid-connected photo voltaic power system and compute system's load margins. By using this simulation program and IEEE case studies, we conducted a research on the characteristics of load margins under varied conditions such as different installed locations of PV system, and different levels of solar power injection.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วย คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร. วรุตม์ สุอำพัน อาจารย์ที่ปรึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และได้กรุณาตรวจแก้ไข จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้คณะผู้จัดทำรู้สึกปลาบปลื้มและซาบซึ้งถึงพระคุณ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้คอยอบรมสั่งสอน คอยดูแลเอาใจใส่และอบรมวิชาความรู้ ความเข้าใจในเนื้อหาของวิชาต่างๆที่ได้ศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้สามารถนำความรู้ต่างๆที่ได้จากคณาจารย์ทุกท่านมาประยุกต์พัฒนา และนำมาประกอบจัดทำเป็นปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตคือ บิดา มารดาและครอบครัวที่ได้ดูแลเอาใจใส่ สนับสนุนด้านการศึกษาอย่างเต็มที่ตลอด คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	4
2.1.1 สมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.1.1.1 กระแสและแรงดันไฟฟ้า	5
2.1.1.2 วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.1.1.3 ผลกระทบจากความเข้มแสงและอุณหภูมิ	6
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	7
2.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	11
2.3.1 ส่วนไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.3.2 ส่วนอินเวอร์เตอร์	12
2.3.3 ส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ	13
2.4 เพอร์ยูนิต(Per Unit)	14
2.4.1 การหาค่าฐานระบบ 1 เฟส (Single Phase System)	14
2.4.2 การหาค่าฐานระบบ 3 เฟส (Three Phase System)	14
2.5 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์	15
2.5.1 พื้นฐานการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์	15
2.5.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย	16
2.5.3 วงจรสมมูลที่มีการต่อหม้อแปลง	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 การคำนวณพาวเวอร์โพล์ด้วยวิธีนิวตัน ราบสัน	17
2.6.1 วิธีหาค่าตอบระบบสมการด้วยวิธีนิวตัน ราบสัน	17
2.6.1.1 ตัวแปรสถานะ	18
2.6.1.2 ฟังก์ชันจาโคเบียน	18
2.6.1.3 ฟังก์ชัน $f(x)$	18
2.6.2 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์พาวเวอร์โพล์	18
2.6.3 สมการพื้นฐานในการคำนวณพาวเวอร์โพล์	19
2.6.4 ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า	20
2.7 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า	23
2.7.1 การพังทลายของแรงดันไฟฟ้า	23
2.8 CP FLOW	24
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	26
3.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	27
3.2 ออกแบบการทดลอง	31
3.2.1 การทดลองที่ 1	35
3.2.2 การทดลองที่ 2	35
3.2.3 การทดลองที่ 3	36
3.2.4 การทดลองที่ 4	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการทดลองที่ 1	37
4.2 ผลการทดลองที่ 2	40
4.3 ผลการทดลองที่ 3	51
4.4 ผลการทดลองที่ 4	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ	67
ภาคผนวก ข DATASHEET	72
ภาคผนวก ค ข้อมูลรายละเอียดในระบบไฟฟ้ากำลัง	77
ภาคผนวก ง คำอธิบายการใช้งานหน้าจอแกรม	89
ประวัติผู้เขียน	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	7
2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย	7
2.5 (ก) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะลัดวงจร (ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะเปิดวงจร	8
2.6 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	12
2.7 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง	13
2.8 (a) แรงดันแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย (b) วงจรสมมูลนอร์ตัน	15
2.9 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง	16
2.10 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า	16
2.11 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง	19
2.12 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า	19
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max})กับแรงดันวิกฤต(V_{crit})	24
3.1 แผนผังการออกแบบวิธีหาค่าตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	27
3.2 แผนผังวิธีหาค่าตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน(ส่วนที่1)	28
3.3 แผนผังวิธีหาค่าตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน(ส่วนที่2)	29
3.4 แผนผังการออกแบบวิธีหาค่าตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยรวม	30
3.5 Test system case IEEE 9 bus	32
3.6 Test system case IEEE 14 bus	33
3.7 Test system case IEEE 39 bus	34
4.1 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า IEEE 9 bus system	37
4.2 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า IEEE 14 bus system	38
4.3 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า IEEE 39 bus system	38
4.4 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ IEEE 9 bus system	40
4.5 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบ ที่บัสต่างๆ IEEE 9 bus system	40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆของ IEEE 9 bus system	41
4.7 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น (ณ โหลดรวมเท่ากับ 600 MW) กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าระบบที่บัสต่างๆของ IEEE 9 bus system	42
4.8 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัสต่างๆ ของ IEEE 14 bus system	43
4.9 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าระบบที่บัสต่างๆของ IEEE 14 bus system	43
4.10 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆของ IEEE 14 bus system	45
4.11 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น (ณ โหลดรวมเท่ากับ 600 MW) กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัสต่างๆของ IEEE 14 bus system	46
4.12 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัสต่างๆ ของ IEEE 39 bus system	47
4.13 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 39 bus system	47
4.14 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้า IEEE 39 bus system	49
4.15 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น (ณ โหลดรวมเท่ากับ 10000MW) กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้า IEEE 39 bus system	50
4.16 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 5 และบัส 9 จำนวน 5% ,10%และ 20% ของโหลดรวมของระบบ ของ IEEE 9 bus system	51
4.17 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่ บัส 5 และบัส 9 ของ IEEE 9 bus system	51
4.18 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 5 และบัส 9 ของ IEEE 9 bus system	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 5 และบัส 9 (ณ โหลดรวมเท่ากับ 600MW) ของ IEEE 9 bus system	53
4.20 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส10,13และบัส 14 จำนวน 5% ,10%และ 20% ของโหลดรวมของระบบ ของ IEEE 9 bus system	54
4.21 กราฟ Load margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าระบบที่ บัส10 ,13 และบัส 14ของ IEEE 14 bus system	54
4.22 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส10,13และบัส14 ของ IEEE 14 bus system	55
4.23 กราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 10,13และ 14 (ณ โหลดรวมเท่ากับ 600MW) ของ IEEE 14 bus system	56
4.24 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส4,8,16,21,24 และบัส 26 จำนวน 5% ,10%และ 20% ของโหลดรวมของระบบของ IEEE 39 bus system	57
4.25 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าระบบที่ บัส4,8,16,21,24 และบัส 26 ของ IEEE 39 bus system	57
4.26 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส4,8,16,21,24 และบัส 26 ของ IEEE 39 bus system	58
4.27 กราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อต่อของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 4,8,16,21,24 และบัส 26 (ณ โหลดรวมเท่ากับ 10000MW)	59
4.28 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 14 ของ IEEE 14 bus system	60
4.29 กราฟLoad margin ของระบบเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 14 ของIEEE 14 bus system	60
4.30 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 14 ของ IEEE 14 bus system	61

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนของบัส 14 ซึ่งมีการต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 14 (บัสชนิด PV)	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.2 การเปรียบเทียบวิธีการคำนวณหาค่าตอบพาวเวอร์โพล์	22
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	31
3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	31
4.1 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 41 เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus system	41
4.2 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 44 เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 14 bus system	44
4.3 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 48 เข้าที่ บัส 5 และบัส 9 ของ IEEE 39 bus system	48
4.4 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 52 เข้าระบบที่ บัส10 ,13 และบัส 14ของ IEEE 14 bus system	52
4.5 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 55 เข้าระบบที่บัส14 ของ IEEE 14 bus system	55
4.6 ตารางการเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้า เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่ บัส4,8,16,21,24 และบัส 26 ของ IEEE 39 bus system	58
4.7 ตารางการเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัส14 ของ IEEE 14 bus system	61
ข.1 ข้อมูลแต่ละบัส 9 บัส IEEE	78
ข.2 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 9 บัส IEEE	79
ข.3 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 9 บัส IEEE	79
ข.4 ข้อมูลแต่ละบัส 14 บัสIEEE	80
ข.5 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 14 บัสIEEE	81
ข.6 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัสIEEE	82
ข.7 ข้อมูลแต่ละบัส 39 บัส IEEE	83
ข.7 ข้อมูลแต่ละบัส 39 บัส IEEE (ต่อ)	84
ข.7 ข้อมูลแต่ละบัส 39 บัส IEEE (ต่อ)	85
ข.8 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 39 บัส IEEE	86
ข.9 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 39 บัส IEEE	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

ข.9 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 39 บัส IEEE (ต่อ)

88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากการศึกษา PDP ฉบับปรับปรุงล่าสุดพบว่า ประเทศไทยมีแผนที่จะขยายการผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากประเทศไทยมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทุกปีตามการเติบโตของเศรษฐกิจ ซึ่งใน PDP ฉบับปรับปรุงล่าสุด (PDP 2010 ฉบับปรับปรุง 3) ได้มีแผนที่จะสร้างโรงไฟฟ้าเพิ่มและปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่ให้ดียิ่งขึ้น เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าและได้มีแผนที่จะเพิ่มสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากประเทศไทยมีสภาพภูมิประเทศและสภาพอากาศเหมาะสมกับพลังงานแสงอาทิตย์ จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องมีการวิเคราะห์ว่าเมื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว เสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นอย่างไร วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการสร้างโปรแกรมเพื่อจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเน้นในเรื่องเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ต้องสามารถรักษาแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและภายหลังจากการถูกรบกวนโดยการรบกวนขนาดเล็ก (Small disturbance) หรือการรบกวนขนาดใหญ่ (Large disturbance)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาแบบจำลองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางแรงดันในสภาวะคงที่ของระบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน
3. ใช้วิธีการ CP FLOW เพื่อวิเคราะห์หา load margin

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. วิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดัน (Voltage stability) โดยเขียนโปรแกรมคำนวณจากซอฟต์แวร์ MATLAB
2. ใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน (Newton Raphson) เพื่อหาคำตอบของระบบไฟฟ้ากำลัง และใช้เทคนิค CP FLOW ในการวิเคราะห์ load margin
3. เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย ขั้นตอนวิธีการศึกษาที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. กำหนดขอบเขตโครงการ และศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เสถียรภาพทางแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง ศึกษาการวิเคราะห์พาวเวอร์ฟลว์ (Power Flow) ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธี นิวตันราฟสัน (Newton Raphson) ในการหาคำตอบสุดท้าย และการใช้เทคนิค CP FLOW (Continuous Power Flow) มาใช้ในการวิเคราะห์ load margin

2. ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB และเขียนโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง

3. ทำการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

4. นำระบบจำลองมาวิเคราะห์ผลการทดลอง และแก้ไขหากผลการจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลอ้างอิง

5. สรุปผลการทดลอง

6. จัดทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ส.ค. 2557	ก.ย. 2557	ต.ค. 2557	พ.ย. 2557	ธ.ค. 2557	ม.ค. 2558	ก.พ. 2558	มี.ค. 2558	เม.ษ. 2558
1.กำหนดขอบเขตงาน และศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ รวมถึงบทความและงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง									
2.ศึกษาการเขียนโปรแกรมMatlab และเขียนโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ									
3.ทำการจำลองระบบกำลังไฟฟ้าที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นส่วนหนึ่งในระบบโดยใช้โปรแกรม Matlab									
4.ทำการวิเคราะห์และแก้ไขแบบจำลอง									
5.สรุปผลการทดลอง									
6.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้เรียนรู้การสร้างทำแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง
2. สามารถนำหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันมาให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการใช้งานจริงได้
3. ได้นำหลักการของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและหลักการทางคณิตศาสตร์โปรแกรม มาใช้ในการวิจัยเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องในการวิจัย แบบจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การหาค่าตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธี นิวตัน رافสัน การใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้า เนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ [1]

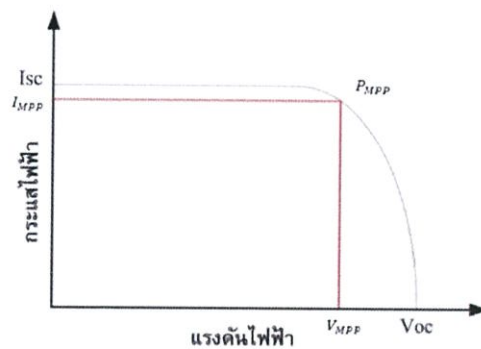
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยกระบวนการโฟโตโวลเทอิก(Photovoltaic Effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำที่มีค่าต่างกัน โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน(silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์(Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์(Indium Phosphide) เป็นต้น มาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ เมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นเซลล์รังสีของแสงที่มีอนุภาคพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ

โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ และสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้กันมาก คือ ซิลิกอน(silicon) เนื่องจากมีราคาถูกและมีมากบนโลก จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี(เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็น ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีลักษณะเหมือนไดโอด เมื่อมีการต่อเข้ากับวงจรภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า

2.1.1 สมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.1.1 กระแสและแรงดันไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นกระแสตรง โดยที่แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นกับความเข้มของแสง และอุณหภูมิ รูปที่ 2.1 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับโวลต์ที่แปรค่าตั้งแต่สภาวะลัดวงจร(Short circuit) จนถึงสภาวะวงจรถัด (Open circuit) โดยจุดตัดแกนตั้งที่แรงดันเป็นศูนย์ จะได้ค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจร(Short circuit current: I_{sc}) ส่วนจุดตัดแกนนอนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันวงจรถัด(Open circuit current: V_{oc})เมื่อนำมาค่ากระแสคูณกับแรงดัน ก็จะได้กำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีจุดเดียวที่เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด(Maximum power point: P_{MPP}) ส่วนกระแสกับที่แรงดันที่จุดนี้เรียกว่า กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Current at maximum power point: I_{MPP}) กับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Voltage at maximum power point: V_{MPP})



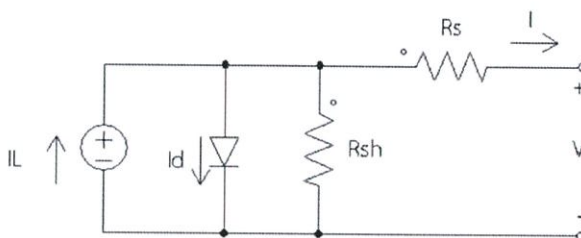
รูปที่ 2.1 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การระบุค่าสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้จากการทดสอบวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) โดยต่อภาระทางไฟฟ้าที่สามารถแปรค่าได้ตั้งแต่สภาวะเปิดวงจรถัดไปจนถึงสภาวะลัดวงจรเข้ากับแผงเซลล์ แล้วให้แสงแก่แผงเซลล์ โดยควบคุมสภาพแวดล้อมที่สภาวะมาตรฐาน(Standard Test Condition:STC) คือ ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร สเปกตรัมของแสงที่ Air Mass(AM) 1.5 และอุณหภูมิด้านหลังแผงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

2.1.1.2 วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแทนด้วยวงจรสมมูล ดังรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่อขนานกับไดโอด(รอยต่อพี-เอ็น)และ ความต้านทานขนาน(R_{sh}) แล้วจึงต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม(R_s) โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสเป็นค่ากระแสคงที่ ซึ่งแปรผันตามความเข้มแสง

ความต้านทานอนุกรม(R_s)เป็นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากจุดเชื่อมต่อ(wiring contact) ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับเซลล์ ส่วนความต้านทานขนาน(R_{sh}) เกิดขึ้นเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าในลักษณะไปอัสย้อนกลับให้ไดโอด



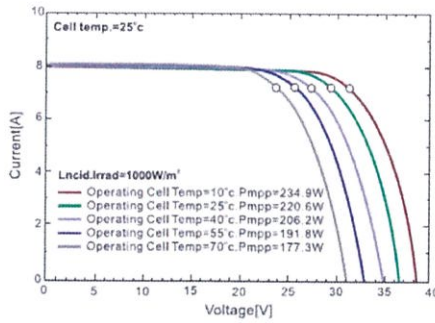
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

ทางอุดมคติจะไม่มีกระแสไหลย้อนกลับ แต่ในความเป็นจริงจะมีกระแสไหลย้อนกลับในระดับต่ำ นั้นแสดงให้เห็นว่ามีเส้นทางที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ดังนั้นจึงแทนด้วยความต้านทานขนาน(R_{sh}) ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความต้านทานอนุกรมที่มีค่าต่ำมาก ดังสมการที่ 2.1 เป็นสมการทางสถิติของเซลล์แสงอาทิตย์

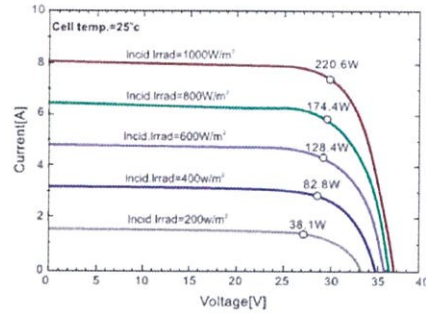
$$I = I_L - I_o \left\{ \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

2.1.1.3 ผลกระทบจากความเข้มแสงและอุณหภูมิ

เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ จะได้กราฟ I-V curve ที่ระดับต่างๆ ดังแสดงรูปที่ 2.3 โดยที่ รูปที่ 2.3 (ก) เป็นกรณีที่ความเข้มแสงคงที่แต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง แต่กระแสไฟฟ้าวจรกลับมีค่าสูงขึ้น แต่ในกรณีจากรูปที่ 2.3(ข) เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงจะทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น แต่แรงดันเปิดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



(ก)



(ข)

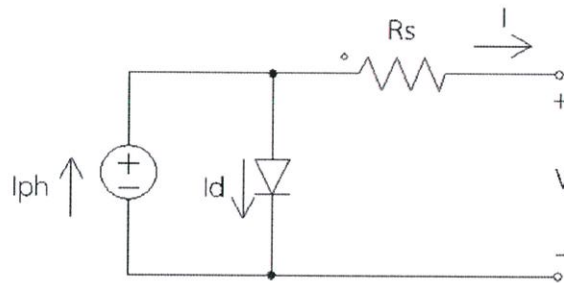
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

(ก)กรณีความเข้มแสงคงที่($1000\text{W}/\text{m}^2$)แต่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

(ข)กรณีอุณหภูมิคงที่(25°C)แต่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

ในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นที่จะต้องมีความรู้ข้อมูลที่ได้จากแผ่นแสดงคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 2.1 จากนั้นนำมาออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเลือกวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วยไดโอด 1 ตัวที่มีความต้านทานอนุกรมเพียงตัวเดียว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานมีค่าความต้านทาน (R_{sh}) สูงมากพอที่จะไม่นำมาพิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) จะมีผลและมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

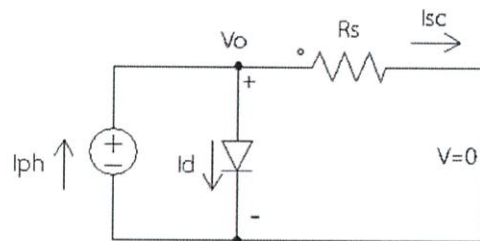
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลเฉพาะ ภายใต้มาตรฐานการทดสอบ(STC)	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ
-กำลังไฟฟ้าสูงสุด : P_{mpps}	-กำลังไฟฟ้าที่สูงสุดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ : ΔP_{mpp}
-กระแสลัดวงจร : I_{scs}	-แรงดันที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ : ΔV_{mpp}
-แรงดันเปิดวงจร : V_{ocs}	-แรงดันวงจรเปิดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ : ΔV_{oc}
-แรงดันที่ให้กำลังสูงสุด : V_{mpps}	-กระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ : ΔI_{sc}
-จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม : N_s	
-จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน : N_p	

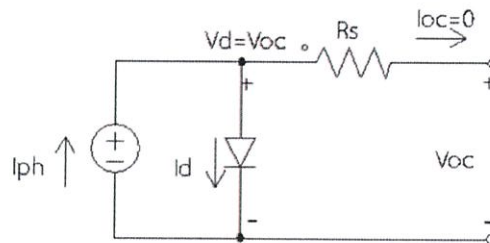
จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.4 กระแสเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

โดย I_{ph} คือ กระแสโฟโต้
 V_t คือ Thermal Voltage
 I_{sat} คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะลัดวงจร

(ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะเปิดวงจร

ในสภาวะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5 (ก) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสโฟโต้ตามสมการที่ 2.3

$$I_{ph} = I_d + I_{sc} \quad (2.3)$$

กระแสจะไหลผ่านไดโอดน้อยมากจนไม่มีผลต่อการคำนวณที่สภาวะลัดวงจร แต่ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อค่ากระแสโฟโต้ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.4

$$I_{ph}(G_a, T) = I_{scs} \frac{G_a}{G_{as}} [1 + \Delta I_{sc}(T - T_s)] \quad (2.4)$$

เมื่อ I_{scs} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน(STC)

G_a คือ ค่าความเข้มแสง

G_{as} คือ ค่าความเข้มแสงมาตรฐาน($1000\text{W}/\text{m}^2$)

ΔI_{sc} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin)

T_s คือ ค่าอุณหภูมิมาตรฐาน(298 K)

ในสภาวะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5 (ข) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันเปิดวงจรได้ดังสมการที่ 2.5

$$V_{oc}(T) = V_{ocs} + \Delta V_{oc}(T - T_s) \quad (2.5)$$

เมื่อ V_{ocs} คือค่าแรงดันเปิดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน, ΔV_{oc} คือค่าแรงดันเปิดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิและสามารถหากระแสที่ไหลผ่านไดโอดได้จากสมการที่ 2.6

$$I_{ph}(G_a, T) = I_D(G_a, T) \quad (2.6)$$

ซึ่งสมการของกระแสไดโอดสามารถหาได้จาก

$$I_D(G_a, T) = I_{sat}(G_a, T) \times (e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1) \quad (2.7)$$

เมื่อแรงดันที่ชั่วหาได้จาก

$$V_t(T) = \frac{AkT}{q} \quad (2.8)$$

A คือ ค่า Ideality Factor

I_{sat} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและอุณหภูมิ

q คือ ขนาดของประจุมีค่า 1.602×10^{-19} คูโลมบ์

k คือ ค่าคงที่ Boltzman มีค่า 1.38×10^{-23} J/K

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดตามสมการที่ 2.9

$$I_{sat}(G_a, T) = \frac{I_{ph}(G_a, T)}{e^{\frac{V_{oc}(T)}{V_t(T)} - 1}} \quad (2.9)$$

เมื่อพิจารณาจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}, I_{mpp}) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V_{mpp} + IR_s}{V_t}} - 1 \right] \quad (2.10)$$

นำสมการที่ 2.9 แทนลงในสมการที่ 2.10 จะได้สมการกระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนี้

$$I_{mpp} = I_{ph} - \left[\frac{e^{\frac{V_{mmp} + IR_s}{V_t}} - 1}{e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1} \right] I_{ph} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรม (R_s) กับ Thermal Voltage (V_t)

$$R_s = \frac{V \ln \left[\left[1 - \frac{I_{mmp}}{I_{ph}} \right] e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right)} + \frac{I_{mmp}}{I_{ph}} \right] - V_{mmp}}{I_{mmp}} \quad (2.12)$$

เมื่อ Thermal Voltage (V_t) เป็นค่าขึ้นอยู่กับ *ideality factor* (A) พิจารณาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะหาได้จาก $\frac{dP}{dV} = 0$ เนื่องจาก $P = VI$ จึงเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{dI}{dV} + \frac{1}{V} = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.2 มาแทนในสมการที่ 2.13 จะได้

$$\frac{dl}{dV} = -I_{\text{sat}} \left\{ e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} \left[\frac{1}{V_t} + \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \frac{dl}{dV} \right] \right\} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

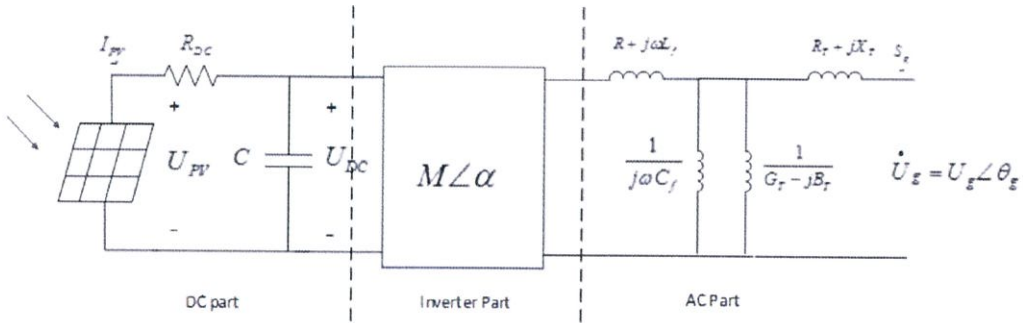
$$\frac{dl}{dV_{V=V_{\text{mpp}}}} = - \frac{\frac{I_{\text{sat}}}{V_t} e^{\frac{V_{\text{mpp}}+IR_s}{V_t}}}{1 + \frac{I_{\text{sat}} R_s}{V_t} e^{\frac{V_{\text{mpp}}+IR_s}{V_t}}} \quad (2.15)$$

สมการที่ 2.14 เป็นการคำนวณค่า $\frac{dl}{dV}$ ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยนำไปเปรียบเทียบกับ $\frac{I_{\text{mpps}}}{V_{\text{mpps}}}$ ซึ่งเป็นคุณลักษณะเอาร์ทพุทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดซึ่งจะทำให้สามารถหาค่า *Ideality factor* (A) และค่า ความต้านทานอนุกรม ซึ่งประมาณได้จากค่าสัมบูรณ์ที่ต่ำสุดของสมการ $\left(\frac{dl}{dV_{V=V_{\text{mpp}}}} + \frac{I_{\text{mpps}}}{V_{\text{mpps}}} \right)$

2.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [3]

แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามรูปที่ 2.6 จะประกอบไปด้วย ส่วนไฟฟ้ากระแสตรง, ส่วนอินเวอร์เตอร์และส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจากรูปแสดงเพียงแค่นี้ เฟส ในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ความต้านทานของสายเคเบิล (R_{DC}) และ คาปาซิเตอร์ (C) แต่อย่างไรก็ตามค่าของความต้านทานของสายเคเบิลมีค่าน้อยมาก จึงทำให้ แรงดันด้านเข้าอินเวอร์เตอร์ (U_{DC}) เท่ากับระบบจ่ายแรงดันพลังงานแสงอาทิตย์ (U_{PV}) ต่อมาคือส่วนของอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ ซึ่งมีตัวแปรคือ อัตราการมอดูเลท (M), มุมเฟสชิฟ (α) และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ (R)

ในส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับจะประกอบไปด้วยฟิวเตอร์ทำหน้าที่รองความถี่ต่ำ โดย L_f คือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า และ C_f คือ ความจุไฟฟ้า และมีหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปยังระบบส่งจ่ายต่อไป โดย R_T คือ ความต้านทาน, X_T คือ รีแอกแตนซ์, G_T คือ ความนำไฟฟ้าและ B_T คือ ค่าชัซเซพแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.3.1 ส่วนไฟฟ้ากระแสตรง

จากวงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันได้จากสมการที่ 2.2 และทำการพิจารณาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (MPP) ดังสมการที่ 2.13 ซึ่งจะทำให้สามารถหาแรงดัน V_{MPP} และกระแส I_{MPP} โดยใช้สมการไม่เป็นเชิงเส้นในการหาคำตอบดังกล่าว

เมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกันจะเกิดแรงดัน V_{PV} , กระแส I_{PV} และได้กำลังไฟฟ้า P_{PV} ดังสมการที่ 2.15 เมื่อ N_s คือจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมอยู่ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ N_{ss} คือ จำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน และ N_{pp} คือ จำนวนชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนานกัน

$$\left. \begin{aligned} U_{PV} &= N_s N_{ss} V_{cell} \\ I_{PV} &= N_{pp} I_{cell} \\ P_{PV} &= U_{PV} I_{PV} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

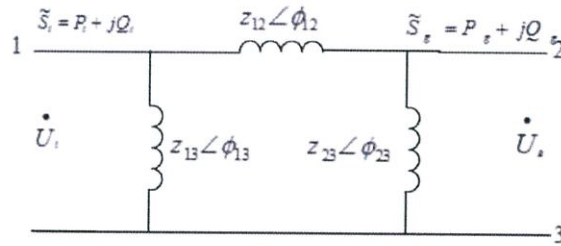
2.3.2 ส่วนอินเวอร์เตอร์

ในส่วนของอินเวอร์เตอร์สามเฟสหลังจากทำการแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จะได้แรงดันเฟส A ดังสมการที่ 2.17 ส่วนแรงดันในเฟส B และ เฟส C จะมีขนาดเท่ากับเฟส A แต่มุมจะต่างกัน 120 องศาตามลำดับ

$$\dot{U}_1 = U_1 \angle \alpha = \frac{\sqrt{2}}{4} M U_{PV} \angle \alpha \quad (2.17)$$

2.3.3 ส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับส่วนไฟฟ้ากระแสสลับจะมีส่วนของฟิลเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นแบบ Y/ Δ



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.7 จะได้กำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดังสมการ

$$P_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos\phi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \cos\phi_{13} - \frac{U_g}{z_{12}} \cos(\theta_g - \alpha - \phi_{12}) \right] \quad (2.18)$$

$$Q_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin\phi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \sin\phi_{13} - \frac{U_g}{z_{12}} \sin(\theta_g - \alpha - \phi_{12}) \right] \quad (2.19)$$

$$P_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos(\alpha - \theta_g - \phi_{12}) + \frac{U_i}{z_{12}} \cos\phi_{12} - \frac{U_g}{z_{23}} \cos\phi_{23} \right] \quad (2.20)$$

$$Q_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin(\alpha - \theta_g - \phi_{12}) + \frac{U_i}{z_{12}} \sin\phi_{12} - \frac{U_g}{z_{23}} \sin\phi_{23} \right] \quad (2.21)$$

2.4 เปรอ์ยูนิต (Per Unit)

เปอร์ยูนิต คือ ปริมาณที่เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณจริง (Actual Quantity) และ ปริมาณ อ้างอิง (Reference Base Quantity)

$$Per\ unit = \frac{Actual}{Base} \quad (2.22)$$

ปริมาณเปอร์ยูนิต (per unit) เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยในการคำนวณเกี่ยวกับระบบ ไฟฟ้ากำลัง ปริมาณที่ต้องหาค่าเปอร์ยูนิต ได้แก่

- อิมพีแดนซ์ (Impedance Z) - แรงดัน (Voltage V)
- กระแส (Current I) - กำลังไฟฟ้า (Power S)

เราสามารถหาค่าต่างๆโดยใช้สมการพื้นฐาน $S=VI^*$, $V=IZ$, $P=S\cos\Phi$, $Q=S\sin\Phi$ $Z=R+jX$ และ $Y=1/Z$

2.4.1 การหาค่าฐานระบบ 1 เฟส (Single Phase System)

เราสามารถคำนวณเพื่อหาค่าฐานได้เมื่อเรากำหนดค่าฐานอ้างอิงขึ้นมา 2 ตัว เช่น ฐานกำลังไฟฟ้าและแรงดัน

$$I_{Base} = \frac{S_{Base1\phi}}{V_{Base\ L-N}} = \frac{kVA_{Base1\phi}}{kV_{Base1\phi}} \quad (2.23)$$

$$Z_{Base} = \frac{V_{Base\ L-N}}{I_{Base}} = \frac{(kV_{Base1\phi})^2 \times 1000}{kA_{Base1\phi}} = \frac{(kV_{Base1\phi})^2}{MVA_{Base}} \quad (2.24)$$

2.4.2 การหาค่าฐานระบบ 3 เฟส (Three Phase System)

$$I_{Base} = \frac{S_{Base1\phi}}{\sqrt{3} \times V_{Base\ L-L}} \quad (2.25)$$

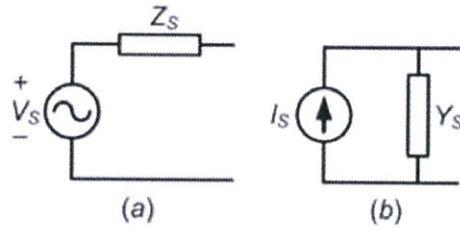
$$Z_{Base} = \frac{V_{Base\ L-L}}{\sqrt{3} \times I_{Base}} = \frac{(V_{Base\ L-L})^2}{S_{Base3\phi}} = \frac{(V_{Base\ L-N})^2}{S_{Base1\phi}} = \frac{(V_{Base\ L-L}/\sqrt{3})^2}{S_{Base3\phi}/3} \quad (2.26)$$

$$S_{p.u.1\phi} = S_{p.u.3\phi} \quad (2.27)$$

2.5 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ [4]

2.5.1 พื้นฐานการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แสดงกระแสที่ไหลที่โหนดของจุดเชื่อมต่อเครือข่ายระบบไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดัน นั่นคือมันตัวแสดงพฤติกรรมของส่วนประกอบต่างๆในระบบ การสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เรากำหนดให้นิวตรอนเป็นโหนดอ้างอิงและสัมพันธ์กับโหนด(เฟส a) บัสแรงดันหรือบัสที่มีกระแสถูกจ่ายเข้า(Line-Neutron) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 (a) แรงดันแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย (b) วงจรสมมูลนอร์ตัน

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} \text{ และ } Y_s = \frac{1}{Z_s} \quad (2.28)$$

$$I = Y_{bus} V \quad (2.29)$$

โดย I = เวกเตอร์กระแสโหนด

Y_{bus} = แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

V = เวกเตอร์แรงดันโหนด

ซึ่งเขียน Y_{bus} ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n (y_{ij}) & -y_{ij} \\ -y_{ij} & \sum_{j=1, j \neq i}^n (y_{ij}) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

โดยที่ $y_{ji} = y_{ij}$ คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส j

2.5.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย (Equivalent pi circuit: Π)



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง

R_{pq} คือ ความต้านทานของสายส่งpq

X_{pq} คืออินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่งpq

y_{pq} คือ โลนซ์ชาร์จิจึงแอดมิตแตนซ์ของสายส่งpq

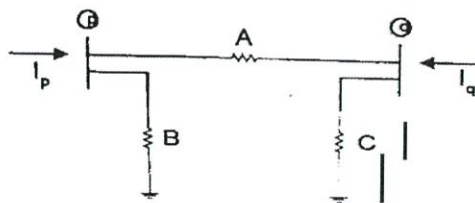
กำหนดให้ $\frac{y_{shpq}}{2} = B$ เมื่อสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้

คือ

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n (y_{ij}) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (B_{ij}) & -y_{ij} \\ -y_{ij} & \sum_{j=1, j \neq i}^n (y_{ij}) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (B_{ij}) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

โดยที่ $y_{ji}=y_{ij}$ คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส j

2.5.3 วงจรสมมูลที่มีการต่อหม้อแปลง



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองด้านของหม้อแปลงในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้ โดยให้ i แทนบัสที่พาวเวอร์โฟลว์ไหลออก j แทนบัสที่พาวเวอร์โฟลว์ไหลเข้า

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\frac{y_{ij}}{|a|^2} \right) & \frac{-y_{ij}}{a^*} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & \sum_{i=1, j \neq i}^n (y_{ij}) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

a คือ อัตราส่วนรอบของหม้อแปลง ถ้าระหว่างบัสใดที่ไม่มีหม้อแปลง a=1

y_{ij} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส j

ดังนั้นเราสามารถเขียนแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เมื่อคิดรวมกันตามวงจรสมมูลจะได้

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\frac{y_{ij} + B_{ij}}{|a|^2} \right) & \frac{-y_{ij}}{a^*} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & \sum_{i=1, j \neq i}^n (y_{ij} + B_{ij}) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

2.6 การคำนวณพาวเวอร์โพล์ด้วยวิธีนิวตัน ราฟสัน [4]

การวิเคราะห์พาวเวอร์โพล์เป็นสิ่งสำคัญและเป็นพื้นฐานของการศึกษาสิ่งที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้า อันได้แก่การวิเคราะห์ความผิดปกติ วิเคราะห์เสถียรภาพ การวางแผนและการจ่ายโหลดอย่างคุ้มค่า ในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งคือการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดต่างๆในระบบซึ่งสามารถศึกษาได้จากความสัมพันธ์ของขนาด (Amplitude) และมุมของแรงดันไฟฟ้า (Angle) ที่บัสต่างๆ กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ไหลผ่านอุปกรณ์ เช่น หม้อแปลงและสายส่งต่างๆรวมถึงกำลังสูญเสียในอุปกรณ์เหล่านั้นด้วย

2.6.1 วิธีหาค่าตอบระบบสมการด้วยวิธีนิวตัน ราฟสัน

สำหรับวิธีการนิวตัน ราฟสัน เริ่มจากการเดาค่าเริ่มต้นของตัวแปรไม่ทราบค่าทั้งหมด (ขนาดและมุมของแรงดันที่โหลดบัส และมุมของแรงดันที่บัสแหล่งจ่าย) ใช้อนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) โดยไม่สนใจอันดับสูงๆ สำหรับแต่ละสมการสมมูลของแต่ละบัส จะทำให้เกิดระบบสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

2.6.1.1 ตัวแปรสถานะ

ตัวแปรสถานะ คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งหมดในที่นี้คือขนาดและมุมของแรงดันที่โหนดบัส และมุมของแรงดันที่บัสแหล่งจ่าย ถูกเรียงในรูปของเวกเตอร์ โดยไล่ลำดับแถวจาก มุมแรงดันบัสแหล่งจ่าย มุมแรงดันบัสโหนด และขนาดแรงดันบัสโหนด

$$\begin{bmatrix} \theta_{pv} \\ \theta_{pq} \\ |V|_{pq} \end{bmatrix}$$

2.6.1.2 ฟังก์ชันจาโคเบียน

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

J คือเมตริกซ์ของอนุพันธ์ย่อย (partial derivatives matrix) ที่รู้จักกันว่า Jacobian

2.6.1.3 ฟังก์ชัน $f(x)$

ฟังก์ชัน $f(x)$ คือ ฟังก์ชันผลต่างของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่ง ณ จุดสมดุลของกำลังไฟฟ้า $f(x)=0$ สมการ $F(x)$ ถูกออกแบบมาดังนี้ $f(x) = \begin{bmatrix} P_i - P_G \\ P_i + P_D \\ Q_i - Q_D \end{bmatrix}$ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ $S=VI^*$ P_G คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากข้อมูลที่กำหนดมา Q_i คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ $S=VI^*$ และ Q_D คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ได้จากข้อมูลที่กำหนดมา การแก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าขนาดและมุมของแรงดันรอบต่อไป ($m + 1$) อ้างอิงจากการทำงานจะทำงาน $\theta^{m+1} = \theta^m + \Delta\theta$ และ $|V|^{m+1} = |V|^m + \Delta|V|$ ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงเงื่อนไขที่ถูกกำหนดไว้ ซึ่งปกติจะหยุดถ้าสมการผลต่างมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ได้

2.6.2 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์พาวเวอร์ฟลว์

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์พาวเวอร์ฟลว์ในที่นี้ถือเป็นบรรทัดฐานที่ใช้อ้างอิงในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการคำนวณพาวเวอร์ฟลว์ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. ระบบกำลังที่ใช้ในการวิเคราะห์พาวเวอร์ฟลว์เป็นระบบไฟฟ้าสมดุล 3 เฟส อยู่ในสภาวะการทำงานปกติ (Steady state condition)
2. ในการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์และสมการพาวเวอร์ฟลว์ จะยึดบัสเป็นกรอบอ้างอิง (Bus of reference)
3. ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีบัสอ้างอิงเพียง 1 บัส
4. ให้ถือว่าโหนดทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลังคงที่
5. วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย (Equivalent pi circuit: π)

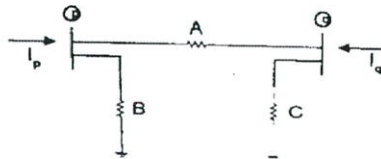


รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง

R_{pq} คือ ความต้านทานของสายส่งpq X_{pq} คืออินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่งpq

Y_{pq} คือ โลนซ์ชาร์จิจึงแอดมิตแตนซ์ของสายส่งpq

ถ้าในระบบกำลังไฟฟ้ามีหม้อแปลงต่อเข้ามาในระบบเราสามารถทำให้อยู่ในรูปวงจรถสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองด้านของหม้อแปลงในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pq} & -Y_{pq} \\ -Y_{pq} & Y_{pq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \tag{2.36}$$

a คือ อัตราส่วนรอบของหม้อแปลง Y_{pq} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง

2.6.3 สมการพื้นฐานในการคำนวณพาวเวอร์โพลว์

ตามสมมติฐานในหัวข้อ 2.2.1 สมการพื้นฐานในการคำนวณพาวเวอร์โพลว์โดยยึดบัสเป็นกรอบอ้างอิงจะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัส (Bus Voltage) ดังนี้

$$I_{BUS} = Y_{BUS} \cdot V_{BUS} \tag{2.37}$$

โดยที่ I_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกระแสบัส V_{BUS} คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัส

Y_{BUS} คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus admittance matrix)

2.6.4 ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางโพลาร์จึงจำแนกบัสในระบบกำลังไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. บัสอ้างอิง จะกำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า
2. บัสควบคุมแรงดัน จะกำหนดให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสคงที่ ส่วนมุมของแรงดันและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า
3. โหลดบัส จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนบัสคงที่ ส่วนขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

ดังนั้น ไม่ว่าจะ เป็นบัสชนิดใดก็ตาม จะกำหนดให้ 2 ปริมาณให้คงที่และอีก 2 ปริมาณเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าซึ่งต้องอาศัยการวิเคราะห์พาวเวอร์โพลาร์เพื่อคำนวณหาตัวแปรไม่ทราบค่าดังกล่าวเพื่อการคำนวณพาวเวอร์โพลาร์เราต้องทราบสมการสมดุลของ กำลังไฟฟ้าจริง(P) และ กำลังไฟฟ้าเสมือน(Q) เพื่อนำมาคำนวณคือ

$$0 = -Q_i + \sum_{k=1}^n |V_i||V_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.38)$$

$$0 = -P_i + \sum_{k=1}^n |V_i||V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (2.39)$$

โดยที่ P_i, Q_i คือกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ถูกจ่ายที่บัส G_{ik} คือส่วนจริงของbus admittance, B_{ik} คือส่วนจินตภาพของbus admittance matrix (Y_{BUS}) ที่ตำแหน่ง i th row and k th column และ $\theta_{ik} = \delta_i - \delta_k$ คือผลต่างมุมแรงดันระหว่างบัส i th และ k th

กำลังไฟฟ้าจริงถูกส่งผ่านจากบัสที่มีมุมแรงดันมากไปสู่บัสที่มีมุมแรงดันน้อย และ กำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกส่งจากบัสที่มีขนาดแรงดันมากกว่าไปสู่บัสที่มีขนาดแรงดันน้อยกว่า ยกเว้นกรณีที่มีมุมแรงดันมีขนาดใหญ่มากๆ

สำหรับวิธีการหาค่าตอบระบบมีหลากหลายวิธี ที่นิยมใช้กันมากคือ Newton-Raphson solution method

สำหรับวิธีการนิวตัน ราฟสัน เริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรไม่ทราบค่าทั้งหมด(ขนาดและมุมของแรงดันที่โหลดบัส และมุมของแรงดันที่บัสแหล่งจ่าย) ใช้อนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) โดยไม่สนใจอันดับสูงๆ สำหรับแต่ละสมการสมดุลของแต่ละบัส จะทำให้เกิดระบบสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

โดยที่ ΔP และ ΔQ สมการผลต่างกำลัง:

$$\Delta P_i = -P_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k|(G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad \Delta Q_i = -Q_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k|(G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

และ J คือเมตริกซ์ของอนุพันธ์ย่อย (partial derivatives matrix) ที่รู้จักกันว่า Jacobian

การแก้ระบบสมการเชิงเส้นทำเพื่อหาค่าขนาดและมุมของแรงดันรอบต่อไป ($m + 1$) อ้างอิงจากการทำงานจะทำงาน $\theta^{m+1} = \theta^m + \Delta\theta$ และ $|V|^{m+1} = |V|^m + \Delta|V|$ ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงเงื่อนไขที่ถูกกำหนดไว้ ซึ่งปกติจะหยุดถ้าสมการผลต่างมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ได้

สรุปแบบรวมของการแก้ปัญหาพาวเวอร์โพล์แบบนิวตัน ราฟสันคือ

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันไม่ทราบค่า
2. แก้สมการสมดุลกำลังไฟฟ้าแต่ละบัส โดยใช้ขนาดและมุมของแรงดันปัจจุบัน
3. แปลงระบบเป็นเชิงเส้นและแก้สมการเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมของแรงดัน
4. ปรับปรุงค่าของขนาดและมุมของแรงดัน
5. ตรวจสอบเงื่อนไข ถ้าตรงตามเงื่อนไขให้จบการทำงานถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขให้เริ่มซ้ำที่ขั้นตอนที่ 2

นอกจาก Newton-Raphson solution method ปัจจุบันมีการนำวิธีอื่นๆที่สามารถเข้ามาแก้ปัญหาพาวเวอร์โพล์ เช่น Fast-decoupled load flow method ที่พัฒนาจากวิธีนิวตัน ราฟสันเนื่องจากสายส่งส่วนใหญ่เป็นความต้านทานเสมือนทำให้ค่าในเมตริกซ์จาโคเบียนที่ไม่ใช่ตำแหน่งเส้นทแยงมุมมีค่าน้อยมาก รูปแบบของการดีคัปปลิงจะใช้รูปแบบขั้นตอนวิธีนิวตัน ราฟสันอย่างง่ายในการแก้ปัญหาพาวเวอร์โพล์ เขียนได้ดังนี้

$$A(x^v) = \begin{bmatrix} J^{v11} & 0 \\ 0 & J^{v22} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

ค่าในเมตริกซ์ตำแหน่งเส้นทแยงมุมเราสามารถแบ่งสมการออกเป็นสองแบบคือ

$$J_{11}^v \Delta\theta^v = \Delta P(x^v) = -[V]B[V] \quad \text{และ} \quad J_{22}^v \Delta|V|^v = \Delta Q(x^v) - [V]B \quad (2.37)$$

โดยที่ $[V]$ คือเมตริกซ์เส้นทแยงมุมของขนาดแรงดัน ($|V|$) และ B เป็นเมตริกซ์ผลรวมส่วนกลับส่วนจินภาพของความต้านทานในวงจรสมมูลแบบพาย วิธีนี้การลู่เข้าของคำตอบใช้การวน 4-7 ครั้ง ในแต่ละครั้งของการวนใช้เวลาเร็วกว่าวิธีเกาส์-ไซด์อล 1.5 เท่าและต้องการการประมวลผลของการวนเทียบกับวิธีนิวตัน ราวสี่ส่วนห้าจะใช้เพียง 0.2 เท่า

สรุปคือ วิธี Fast-decoupled load flow สามารถให้คำตอบที่รวดเร็วกว่าวิธีนิวตัน ราวสี่ส่วนห้า ทำให้สะดวกมากกว่าในการหาคำตอบของระบบไฟฟ้าแต่ค่าความละเอียดน้อยกว่าวิธี นิวตัน ราวสี่ส่วนห้า และ Holomorphic embedding load flow method ซึ่ง HELM เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ถูกพัฒนาเมื่อไม่นานมานี้โดยมีพื้นฐานจากเทคนิคของการวิเคราะห์จำนวนเชิงซ้อน ข้อดีของวิธี HELM คือ จะได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเสมอถ้าระบบที่พิจารณา มีคำตอบ

จากวิธีทั้งหมดเพื่อให้ได้ค่าที่ละเอียดแม่นยำมากที่สุดโดยการคำนวณไม่ซับซ้อน เราจึงเลือกวิธีของ Newton-Raphson solution method มาใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบวิธีการคำนวณหาคำตอบพาวเวอร์โพล์

	เกาส์ (Gauss)	เกาส์-ไซด์อล (Gauss-Sidon)	นิวตัน ราวสี่ส่วนห้า (Newton Raphson)	Fast-decoupled
ความเร็วในการคำนวณ	น้อย	ปานกลาง	มาก	มากที่สุด
ความซับซ้อนในการคำนวณ	น้อย	ปานกลาง	มากที่สุด	น้อย
ความแม่นยำของคำตอบ	มาก	ปานกลาง	มากที่สุด	น้อย

2.7 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถรักษาแรงดันในทุกๆบัสให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและหลังจากการถูกรบกวนโดยการรบกวนขนาดเล็ก (Small disturbance) หรือการรบกวนขนาดใหญ่ (Large disturbance)

การสูญเสียเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเกิดจากการรบกวนเช่น ปริมาณของโหลดที่ต่ออยู่แสดงให้เห็นจากการที่แรงดันเพิ่มหรือแรงดันตกในบางบัส เป็นผลให้เกิดการสูญเสียในโหลดหรือการเปิดวงจรโดยฉับพลัน

2.7.1 การพังทลายของแรงดันไฟฟ้า

การพังทลายของแรงดันไฟฟ้า หมายถึง การพังทลายของแรงดันไฟฟ้ารวมเอาหลายเหตุการณ์ที่ต่อเนื่องกัน การพังทลายของแรงดันไฟฟ้าเป็นเหตุที่ทำให้สูญเสียเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงจนอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถรับได้ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมากในระบบไฟฟ้ากำลัง

กำลังไฟฟ้าเสมือนมี 2 ประเภท คือ แบบเหนี่ยวนำ(Inductive) และแบบเก็บประจุ (Capacity)ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกันและสามารถหักล้างซึ่งกันและกันได้ทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนรวมมีค่าลดลง หรือหักล้างกันจนหมด แหล่งกำเนิดของกำลังไฟฟ้าเสมือนประกอบด้วย

1. โหลดหรือผู้ใช้ไฟฟ้า ประกอบด้วยประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลากหลาย ส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดไฟฟ้าเสมือนจึงต้องมีการชดเชยด้วยกำลังไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุแม้ว่าจะมีการกำหนดให้ผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่มีการชดเชยตัวประกอบกำลังไฟฟ้าด้วยตัวเอง(Power factor)ไม่น้อยกว่า0.85 แต่ก็ยังคงมีความต้องการกำลังรีแอกทีฟในปริมาณที่สูง เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าแบบบ้านพักอาศัยจำนวนมากไม่มีข้อกำหนดในเรื่องดังกล่าว จึงเป็นหน้าที่ของการไฟฟ้าที่จะชดเชยให้

2. สายส่ง สามารถเป็นแหล่งกำเนิดกำลังเสมือนได้ทั้งแบบเหนี่ยวนำและแบบเก็บประจุโดยมีความสัมพันธ์และลักษณะดังนี้

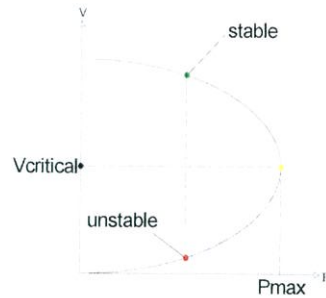
$$\text{กำลังไฟฟ้าเสมือนแบบเก็บประจุ} = V^2 B$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าเสมือนแบบเหนี่ยวนำ} = I^2 B$$

โดย V = แรงดันไฟฟ้าของสาย B = ซีสเซปแทนซ์แบบขนานของสาย

I = กระแสไฟฟ้าของสาย X = รีแอกแตนซ์แบบอนุกรมขางสาย

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า(Voltage Stability Analysis)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max})กับแรงดันวิกฤต(V_{crit})

จากกราฟจุดที่แสดงจุดรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือโหลดสูงสุดเรียกว่าจุด Maximum System ถ้าเพิ่มโหลดมากกว่านี้แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจนไม่สามารถควบคุมได้อีกและปริมาณโหลดค่าใดค่าหนึ่ง จะมีจุดสั่งการ 2 จุดคือ Stable กับ Unstable ซึ่งค่าโหลดค่าหนึ่งควรสั่งการที่จุด Stable point เนื่องจากเป็นจุดที่สามารถควบคุมแรงดันได้ กระแสไฟฟ้าต่ำ และมีความเป็นเสถียรภาพของระบบ

2.8 CP FLOW [5]

CP FLOW เป็นเครื่องมือที่ครอบคลุมสำหรับการติดตามพฤติกรรมของระบบกำลังไฟฟ้าในช่วงสภาวะคงตัว (Steady-state) อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในระบบ ข้อดีของ CP FLOW คือ 1. CP FLOW สามารถรองรับระบบกำลังไฟฟ้าได้ถึง 12,000 บัส 2. มีความสามารถในการรองรับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรได้หลายแบบ 3. ความเร็วและความน่าเชื่อถือของการคำนวณที่มากกว่าวิธีการทำซ้ำในการหาเส้นโค้งคำตอบ 4. CP FLOW สามารถสร้างกราฟเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้าจริงและ หรือกำลังไฟฟ้าเสมือนของโหลดบัส โหลดพื้นที่ และระบบโหลดเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงของบัสควบคุมแรงดัน โดยมีตัวแปรควบคุมคือ λ

CP FLOW มักถูกนำไปใช้ใน 1. การวิเคราะห์ปัญหาของแรงดันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่น แรงดันตก หรือแรงดันพังทลาย 2. การประเมินค่าสูงสุดของความสามารถในการส่งผ่านหรือแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า 3. จำลองพฤติกรรมระบบกำลังไฟฟ้าอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยที่มีหรือไม่มีอุปกรณ์ควบคุมก็ได้ 4. การประสานงานของอุปกรณ์ควบคุมเพื่อประเมินผลความปลอดภัยในสภาวะคงตัว

การติดตามเส้นโค้งคำตอบ

ในการจำลองการประเมินพฤติกรรมของระบบกำลังไฟฟ้า $f(x, \lambda) = 0$, $x \in R^n$, $f \in R^n$, $\lambda \in R$ โดยที่ λ คือกำลังไฟฟ้าจริงและ/หรือกำลังไฟฟ้าเสมือนของความต้องการโหลดและ/หรือการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในการผลิต ใช้วิธีการทางอ้อม (Indirect method) ในการคำนวณ เริ่มต้นจากหาจุดเริ่มต้น (x_0, λ_0) และสร้าง (x_i, λ_i) แสดงทิศทางการเปลี่ยนแปลงของโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนกระทั่งถึงจุดปลายเส้นโค้ง (nose point) ที่คำตอบใกล้จุดปลายเส้นโค้ง (nose point) การใช้วิธีนิวตัน ราบสันจะทำให้คำตอบลู่ออก

CP FLOW จึงแก้ปัญหานี้โดยการเปลี่ยนตัวแปร λ เป็นตัวแปรอื่น $x_{n+1} = \lambda$ จากนั้นนำความยาวส่วนโค้ง(s)มาใช้บนเส้นโค้งคำตอบเป็นตัวแปรใหม่จะได้ $x = x(s)$, $\lambda = \lambda(s) = x_{n+1}$

จะได้สแควร์โซลส์เท่ากับ $\sum_{i=1}^n \{(x_i - x_i(s))^2\} + (\lambda - \lambda(s))^2 - (\Delta s)^2 = 0$ นำสมการนี้กับสมการ $f(x, \lambda) = 0$ จะได้สมการพาวเวอร์โพลาร์ที่เงื่อนไขของรับค่าบริเวณใกล้จุดปลายเส้นโค้ง

วิธีการติดตามเส้นโค้งคำตอบ (Continuation Method) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการสร้างเส้นโค้งคำตอบสำหรับสมการพีชคณิตไม่เป็นเชิงเส้น วิธีการติดตามเส้นโค้งคำตอบมีองค์ประกอบ 4 ประการ

1. การกำหนดตัวแปร (Parameterization): เป็นการระบุคำตอบแต่ละตัวบนเส้นโค้งคำตอบ ซึ่งมีชนิดการระบุที่ต่างกัน 3 ชนิดคือ 1. ตัวแปรควบคุม λ ซึ่งกรณีนี้คือ ความยาวสแควร์ $\Delta \lambda$ 2. ผลต่างตัวแปรควบคุม λ หรือส่วนประกอบของสเตทเวกเตอร์ $x(x_k)$ และความยาวสแควร์คือ $\Delta \lambda$ หรือ Δx_k 3. ระบุความยาวส่วนโค้ง ในที่นี้ใช้ชนิดที่หนึ่งคือใช้กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการและ/หรือกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2. พรีดิคเตอร์ (Predictor): เป็นการหาจุดประมาณสำหรับคำตอบตัวถัดไป พรีดิคเตอร์ออกเป็นสองชนิด คือ ODE ที่ใช้คำตอบปัจจุบันกับอนุพันธ์ของมันในการคาดการณ์คำตอบถัดไปวิธีที่นิยมมากคือ The tangent method และ Polynomial extrapolation based method (การคาดการณ์พหุนาม) ซึ่งใช้เพียงคำตอบปัจจุบันกับคำตอบก่อนหน้ามาคาดการณ์คำตอบถัดไปวิธีที่นิยมมากคือ The secant method ใน CP FLOW การติดตามเส้นโค้งคำตอบจะใช้วิธีแทนเจนท์ในระยะแรกของการติดตามเส้นโค้งคำตอบและใช้ วิธีซีแคนท์ ในระยะที่สอง

3. คอลเรคเตอร์ (Corrector): เป็นการหาค่าที่แท้จริงที่อยู่บนเส้นโค้งคำตอบโดยใช้วิธี นิวตัน ราบสัน

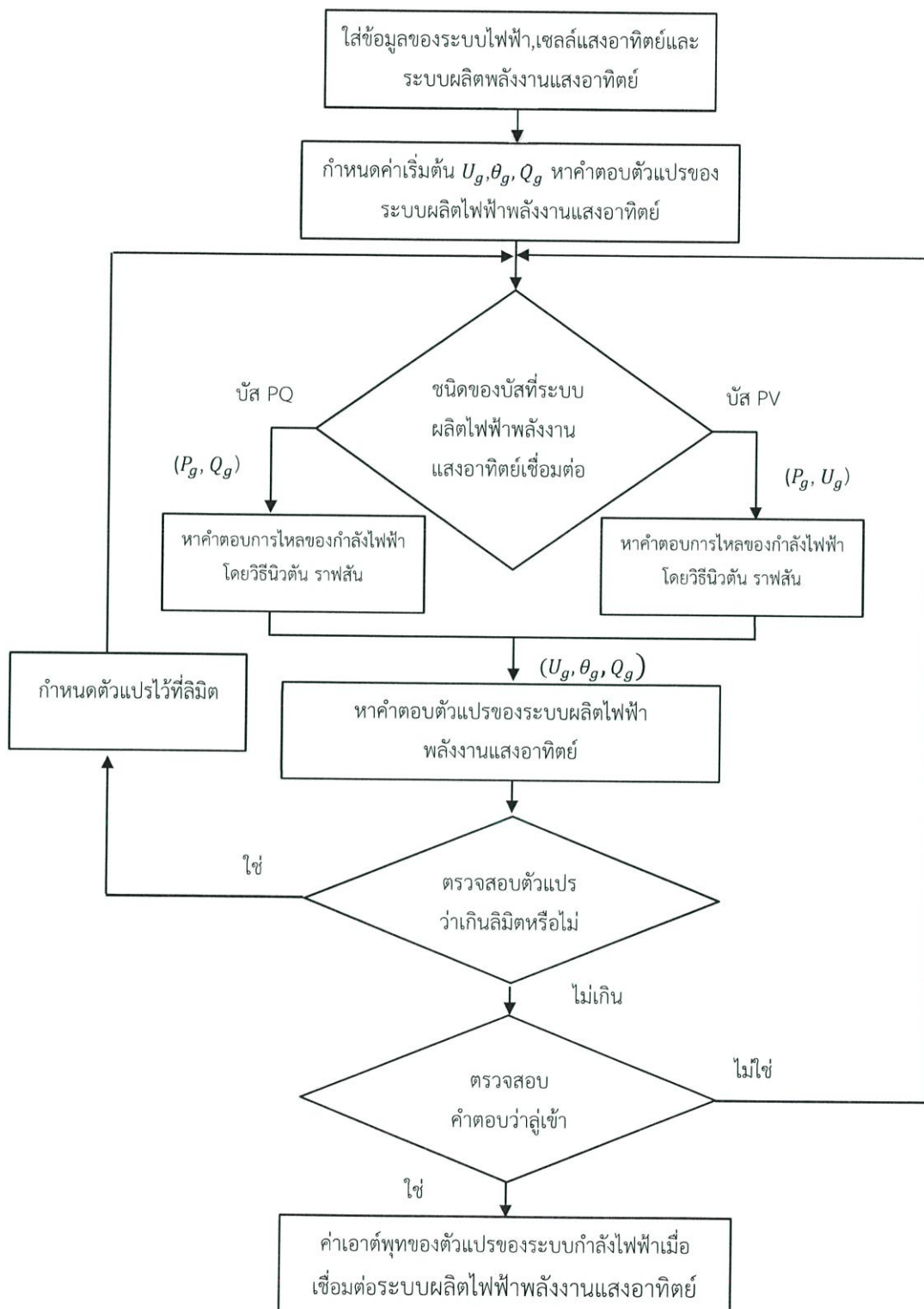
4. การควบคุมความกว้างสแควร์ (Step length control): การควบคุมความกว้างสแควร์สามารถควบคุมให้เป็นค่าคงที่ได้เช่นกันแต่ต้องเลือกค่าที่เหมาะสมเนื่องจากถ้าเลือกความกว้างสแควร์ที่แคบแม้จะมีความละเอียดของเส้นโค้งคำตอบสูงแต่ใช้เวลานานในการคำนวณหรือถ้าใช้ความกว้างสแควร์ที่กว้างแม้จะใช้เวลาที่รวดเร็วแต่จะมีความละเอียดน้อยและค่าพรีดิคเตอร์ไกลจากคำตอบที่แท้จริงทำให้บางครั้งอาจไม่มีคำตอบ

บทที่ 3

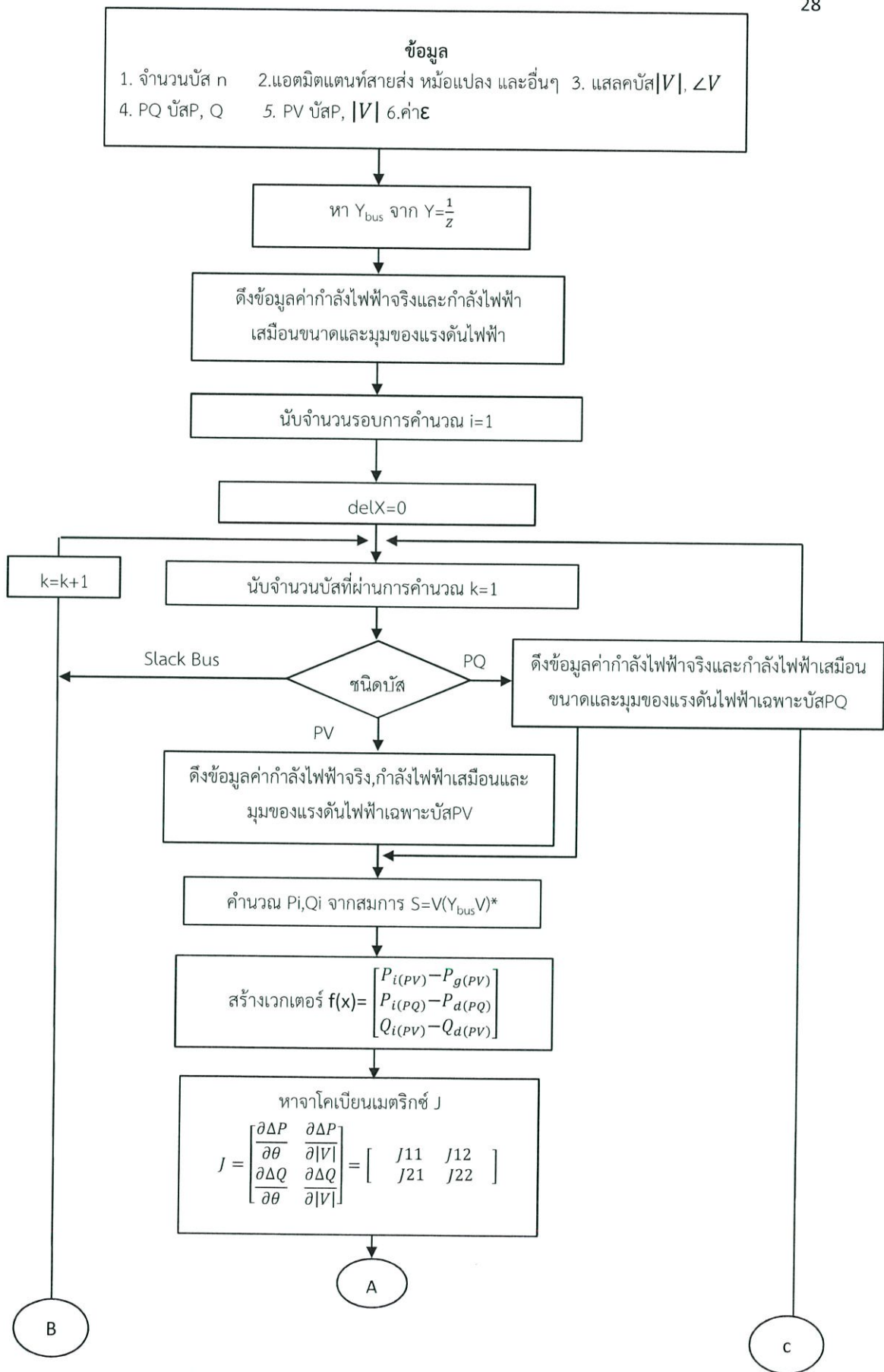
การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการพัฒนาโปรแกรมที่จะใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการทดลอง และส่วนของการทดลองเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากรณีต่างๆ ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมจะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และทำการแก้ปัญหาหาระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear equation system) ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน โดยรูปที่ 3.8 แสดงแผนผังการออกแบบวิธีหาคำตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และ รูปที่ 3.9- รูปที่ 3.10 แสดงแผนผังการหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow solution) ในส่วนของการทดลองเป็นการศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง

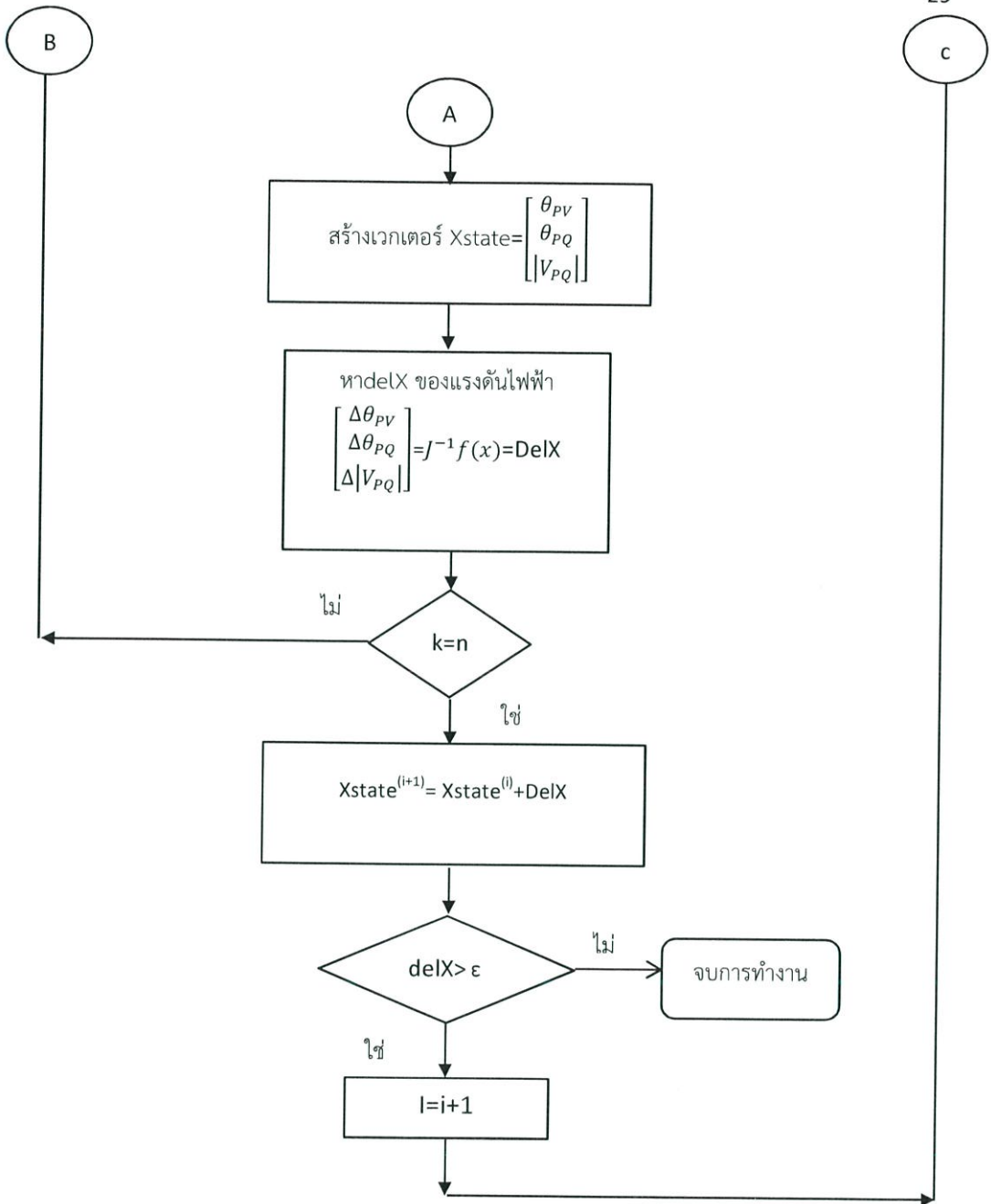
3.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



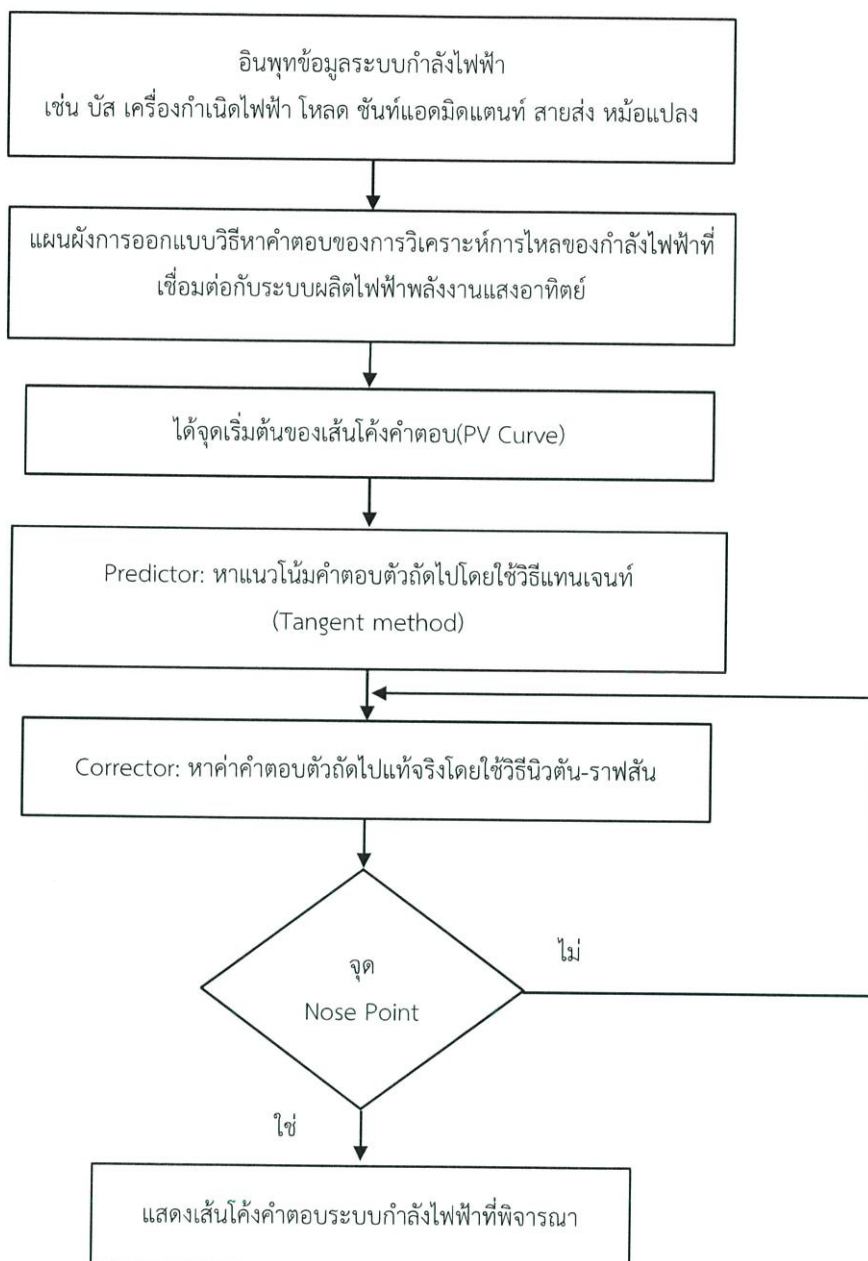
รูปที่ 3.1 แผนผังการออกแบบวิธีหาค่าตอบของการวิเคราะห์การไหลของ กำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.2 แผนผังวิธีหาค่าตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน(ส่วนที่1)



รูปที่ 3.3 แผนผังวิธีหาคำตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน ราบสัน(ส่วนที่2)



รูปที่ 3.4 แผนผังการออกแบบวิธีหาคำตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยรวม

3.2 ออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

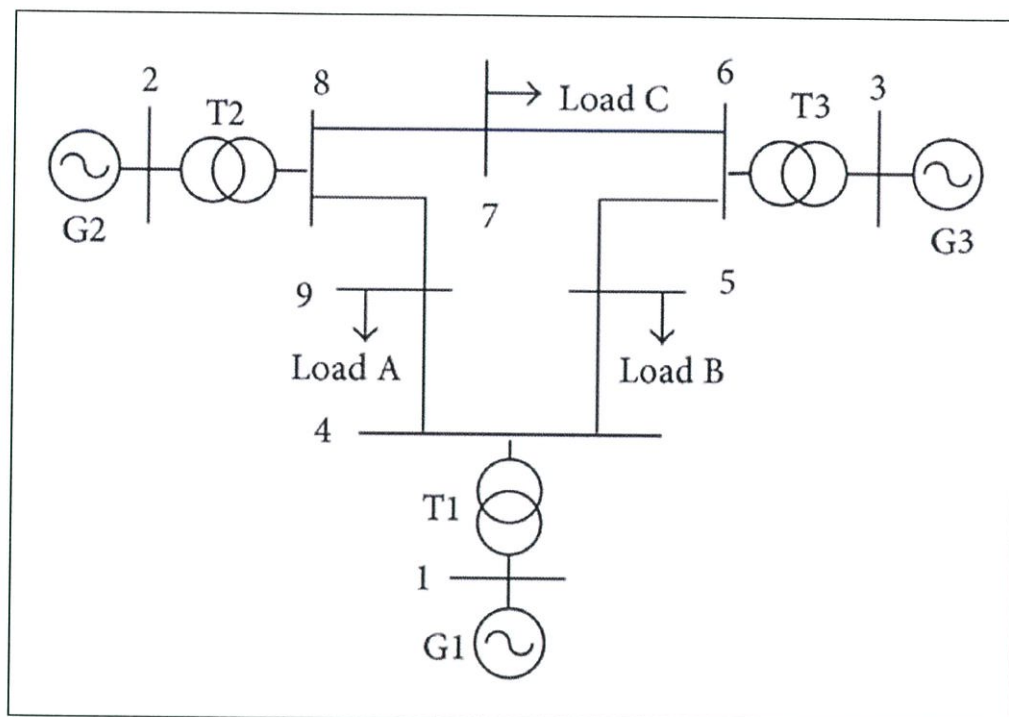
ข้อมูลเฉพาะภายใต้มาตรฐานการทดสอบ(STC)	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ
กำลังไฟฟ้าสูงสุด: $P_{mpps} = 240 \text{ W}$ กระแสลัดวงจร: $I_{sc} = 6.30 \text{ A}$ แรงดันเปิดวงจร : $V_{oc} = 48.6 \text{ V}$ แรงดันที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด : $V_{mpp} = 40.5 \text{ V}$ กระแสที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด : $I_{mpp} = 5.93 \text{ A}$ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม $N_s = 72$	-กำลังไฟฟ้าที่สูงสุดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ: $\Delta P_{mpp} = -0.38\%/K$ -แรงดันไฟฟ้าที่สูงสุดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ: $\Delta V_{oc} = -132.5 \text{ mV/K}$ -กระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ: $\Delta I_{sc} = 3.5 \text{ mA/K}$

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ข้อมูลส่วน PV array	ข้อมูลด้าน AC
พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ : $G_a = 900 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ : $T = 308 \text{ }^\circ\text{K}$ จำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่ต่ออนุกรม: $N_{ss} = 20$ จำนวนชุดโซลาร์เซลล์ที่ต่อขนาน: $N_{pp} = 220$	$L_f = 250 \text{ } \mu\text{H}$, $C_f = 450 \text{ } \mu\text{F}$, $R = 0.001 \Omega$, $R_t = 0.0032 \Omega$, $X_t = 0.0102 \Omega$, $G_t = 0.0152 \Omega$, $B_t = 0.0519 \Omega$ Inverter: แรงดันอินพุต = 450-850Vdc, กระแสอินพุตสูงสุด 2400Adc, แรงดันเอาต์พุต = 480Vac, กระแสเอาต์พุต = 1204Aac, กำลังไฟฟ้า 1MW

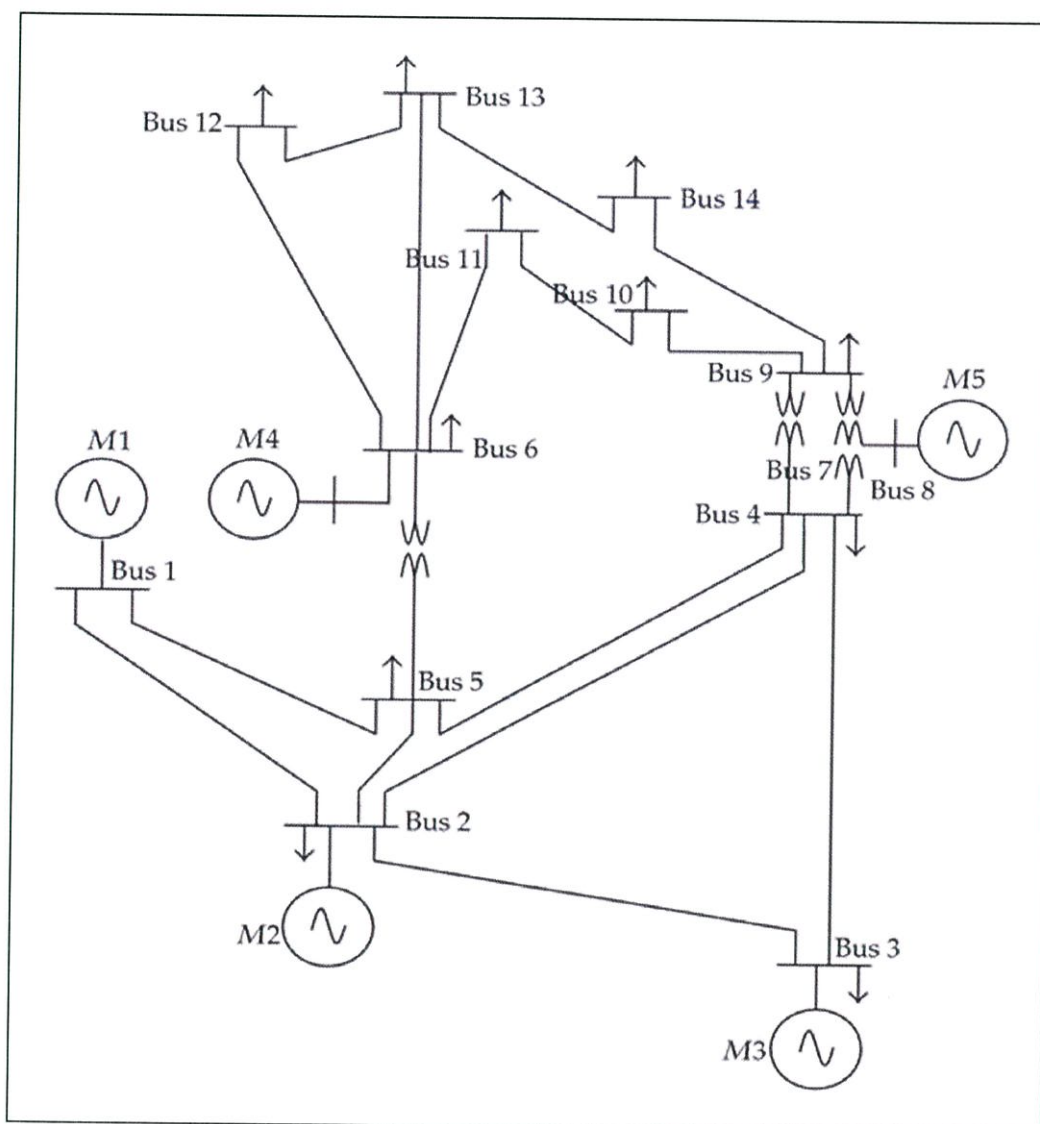
ข้อมูลระบบไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ

1.IEEE 9 bus system



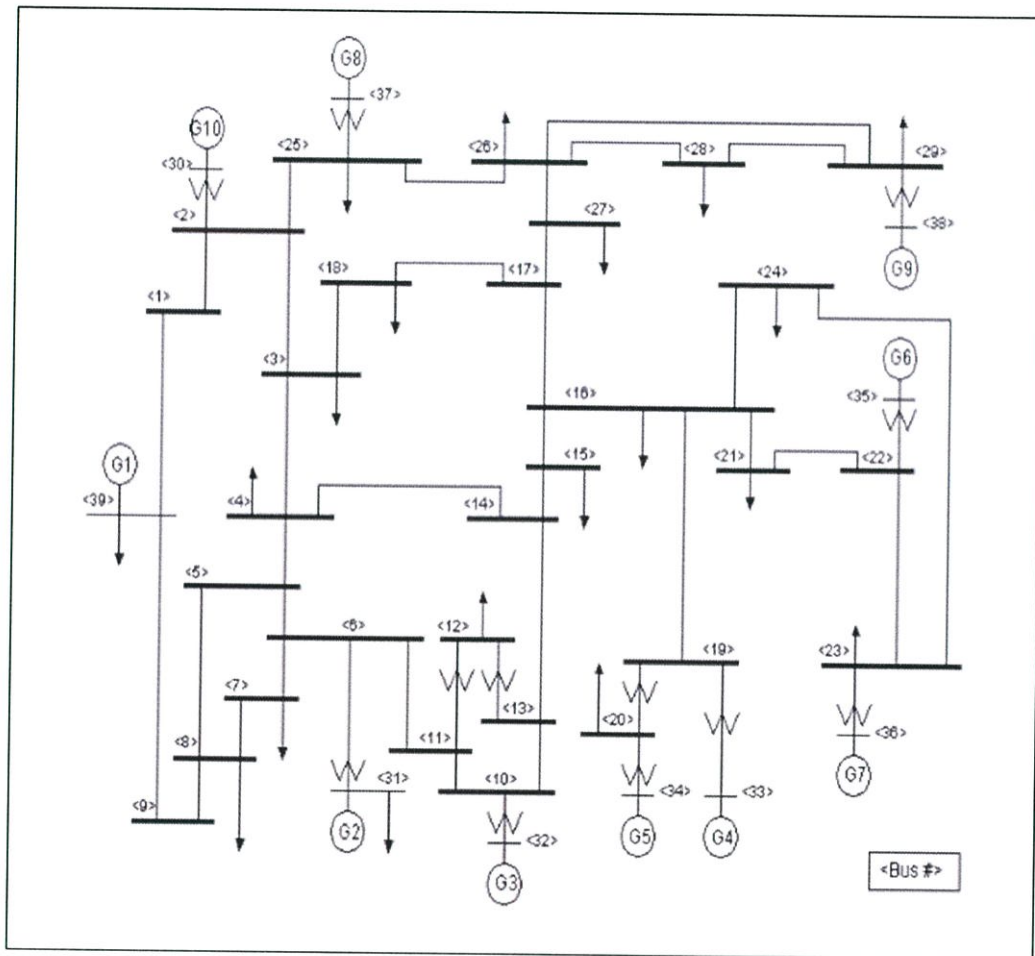
รูปที่ 3.5 Test system case IEEE 9 bus

2.IEEE 14 bus system



រូបភាព 3.6 Test system case IEEE 14 bus

3.IEEE 39 bus system



รูปที่ 3.7 Test system case IEEE 39 bus

3.2.1 การทดลองที่ 1

วัตถุประสงค์ ศึกษา PV Curve ของระบบอ้างอิง Test system case IEEE 9 bus, Test system case IEEE 14 bus, Test system case IEEE 39 bus โดยใช้เทคนิค CP Flow (Continuation power flow) และใช้วิธีนิวตัน ราวสันในการแก้ปัญหาระบบสมการไม่เชิงเส้น (Non-linear equation system) เพื่อหาความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดและหา Load Margin ของระบบในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

วิธีการทดลอง

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Initial power flow solution)
2. หาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow solution) โดยใช้วิธีนิวตัน ราวสันในการแก้ปัญหาระบบสมการไม่เชิงเส้น
3. เพิ่มโหลดของระบบ แล้วหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จุดถัดไปโดยใช้เทคนิค CP Flow จนถึงจุดที่ไม่สามารถหาคำตอบให้กับระบบได้ (Critical point)

3.2.2 การทดลองที่ 2

วัตถุประสงค์ ศึกษาความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบในกรณีที่เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งต่างกัน (Location study) โดยทำการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆกัน เพื่อหาข้อที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อ ทดสอบกับระบบอ้างอิง Test system case IEEE 9 bus, Test system case IEEE 14 bus, Test system case IEEE 39 bus

วิธีการทดลอง

1. เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับสโตนหนึ่งและ หาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow solution) โดยใช้วิธีนิวตัน ราวสันในการแก้ปัญหาระบบสมการไม่เชิงเส้น
2. ใช้เทคนิค CP Flow เพื่อสร้าง PV Curve ของระบบนั้นๆ
3. เปลี่ยนตำแหน่งที่ทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้เทคนิค CP Flow เพื่อสร้าง PV Curve แล้วนำค่าความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาข้อที่เหมาะสมที่สุด

3.2.3 การทดลองที่ 3

วัตถุประสงค์ ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบใดๆ โดยมีขนาด 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์ของโหลดรวมของระบบนั้นๆ ทำการทดสอบกับระบบอ้างอิง Test system case IEEE 9 bus, Test system case IEEE 14 bus, Test system case IEEE 39 bus

วิธีการทดลอง

- 1.ทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับบัสต่างๆหลายๆบัส โดยมีขนาด 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์ของโหลดรวมของระบบนั้นๆ และหาค่าตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow solution) โดยใช้วิธีนิวตัน raphson ในการแก้ปัญหาาระบบสมการไม่เชิงเส้น
- 2.ใช้เทคนิค CP Flow เพื่อสร้าง PV Curve ของระบบนั้นๆ
- 3.นำ PV Curve ของแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกัน เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบใดๆ

3.2.4 การทดลองที่ 4

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีพฤติกรรมแบบ PV model และ PQ model โดย PV system มีขนาด 20 เปอร์เซ็นต์ของโหลดรวมของระบบนั้นๆ ทดสอบกับระบบอ้างอิง Test system case IEEE 14 bus

วิธีการทดลอง

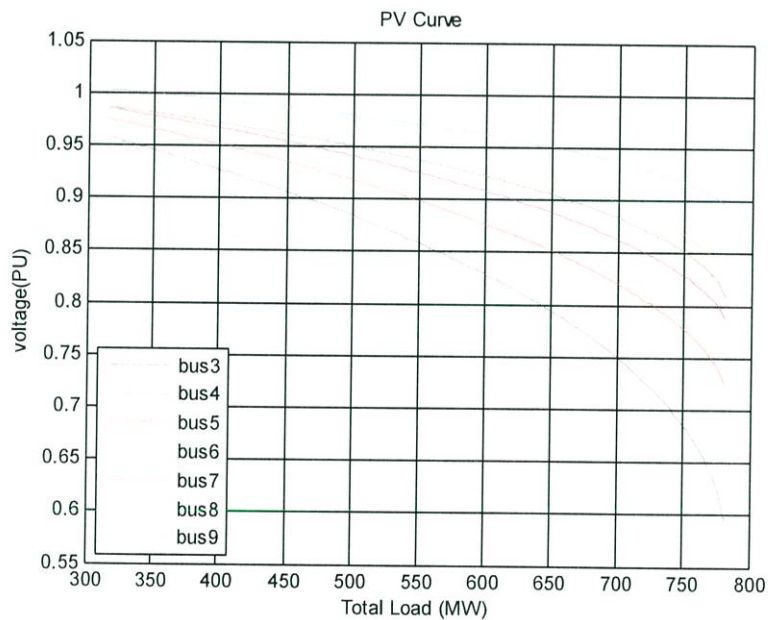
- 1.ทำการเชื่อมต่อ PV system ที่มีพฤติกรรมแบบ PV model เข้ากับระบบอ้างอิง Test system case IEEE 14 bus
- 2.สร้าง PV Curve เพื่อหาความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบ
- 3.ทำการเชื่อมต่อ PV system ที่มีพฤติกรรมแบบ PQ model เข้ากับระบบอ้างอิง Test system case IEEE 14 bus
- 4.สร้าง PV Curve เพื่อหาความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบ แล้วนำทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกัน

บทที่ 4

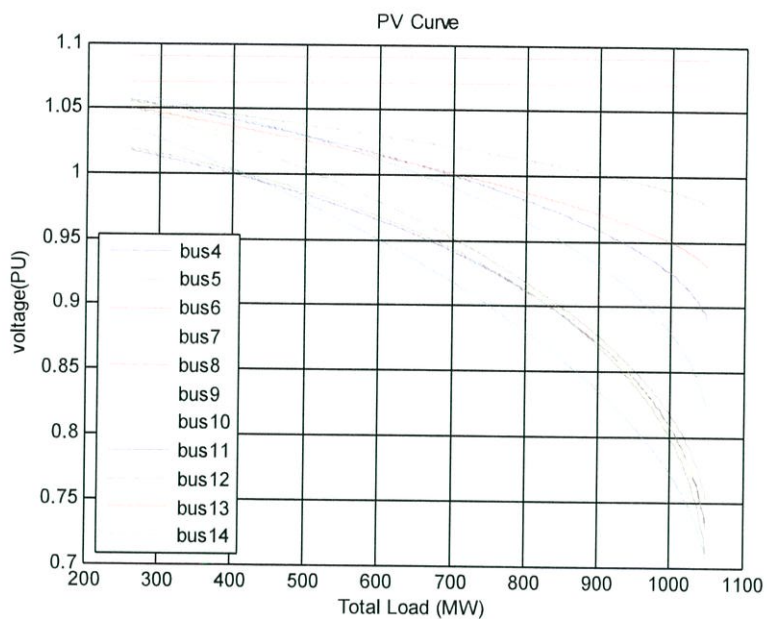
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองซึ่งประกอบด้วยการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษการสร้าง PV Curve โดยใช้เทคนิคเทคนิค CP Flow เพื่อหา Load Margin ของระบบ การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปยังบัสต่างๆ ที่อยู่ต่างพื้นที่กัน(Location study) การทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสัดส่วนในระบบต่างกัน การทดลองที่ 4 เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีเป็นชนิด PV Type และ PQ Type

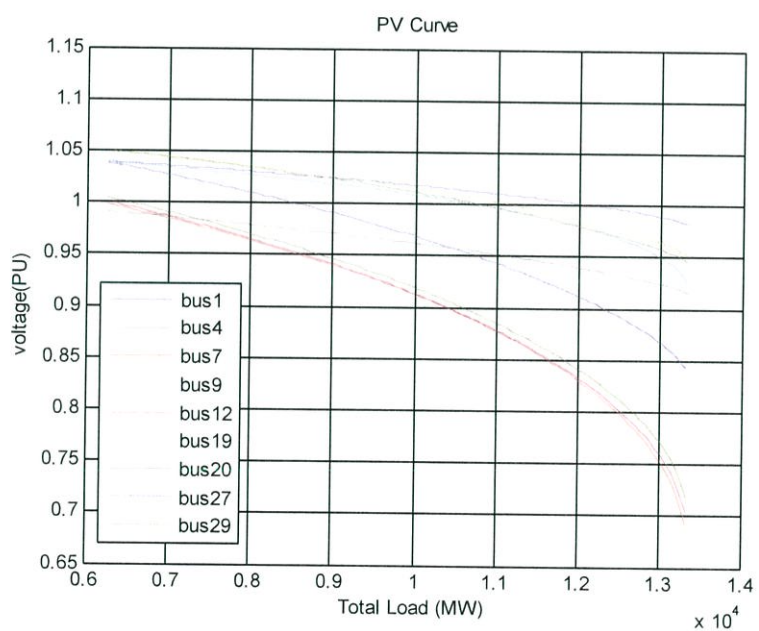
4.1 ผลการทดลองที่ 1 ทำการสร้าง PV CURVE โดยใช้เทคนิค CP Flow เพื่อหา Load Margin ของระบบ ซึ่งจะบ่งบอกถึงเสถียรภาพและความสามารถในการรองรับโหลดของระบบนั้นๆ โดยทดสอบกับระบบอ้างอิง case IEEE 9 bus, case IEEE 14 bus, case IEEE 39 bus



รูปที่ 4.1 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้า IEEE 9 bus system



รูปที่ 4.2 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้า IEEE 14 bus system



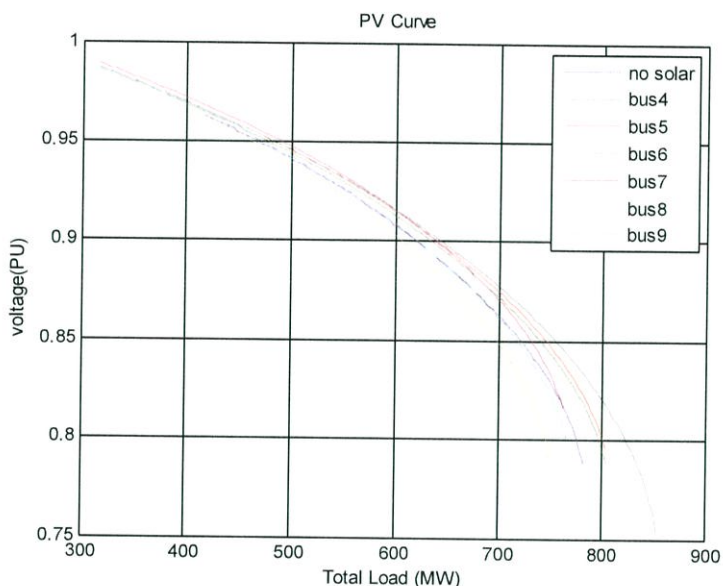
รูปที่ 4.3 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้า IEEE 39 bus system

จากรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จุดเริ่มต้นของกราฟคือจุด normal operation ซึ่งหาได้จากการแก้ปัญหาระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น(non-linear equation) โดยใช้วิธีนิวตัน ลากเส้น ในการหาคำตอบ ณ จุดเริ่มต้น จากนั้นทำการเพิ่มโหลดของระบบและหาจุดคำตอบถัดไปจนถึงจุดที่ไม่สามารถหาคำตอบของระบบได้ ซึ่งทำให้ได้กราฟ PV Curve โดยจุดสุดท้ายของกราฟจะบอกถึงปริมาณโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้ เรียกว่า จุดวิกฤต(critical point) และจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าระบบไฟฟ้า IEEE 9 bus system สามารถรองรับโหลดสูงสุดได้ 2.48 p.u. หรือ 781.2 MW, ระบบไฟฟ้า IEEE 14 bus system สามารถรองรับโหลดสูงสุดได้ 3.55 p.u. หรือ 1048.95 MW และระบบไฟฟ้า IEEE 39 bus system สามารถรองรับโหลดสูงสุดได้ 1.13 p.u. หรือ 13321.5 MW ตามลำดับ และยังสามารถตรวจสอบหาบัสที่อ่อนแอ (Weak bus) ของระบบ ซึ่งคือบัสที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมีค่ามากที่สุดหรือความชันของกราฟ PV Curve ณ บัสนั้นมีค่ามากที่สุด โดยบัสที่อ่อนแอของระบบอ้างอิง IEEE 9 bus คือ บัสที่ 9 ,ระบบอ้างอิง IEEE 14 bus คือ บัสที่ 14 และระบบอ้างอิง IEEE 39 bus คือ บัสที่ 7

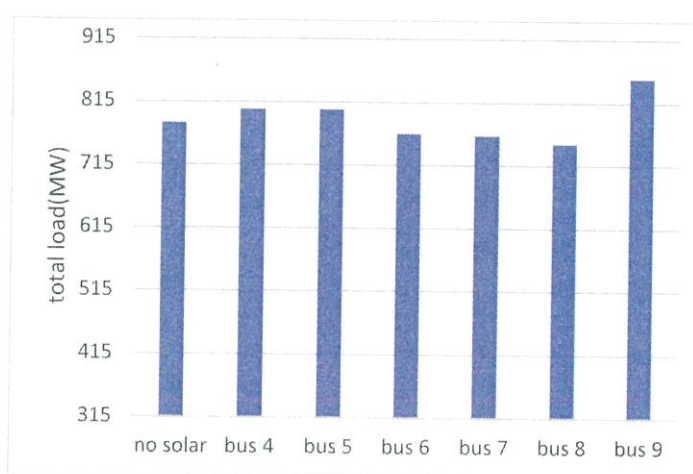
จากผลการทดลองที่ 1 โปรแกรมที่ได้จัดทำขึ้นสามารถสร้างกราฟ PV Curve และทำให้สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังได้ และยังสามารถหาบัสหรือตำแหน่งที่บัสอ่อนแอ(Weak bus) ในเชิงเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าได้อีกด้วย

4.2 ผลการทดลองที่ 2 ทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาด 10% ของโหลดรวมของระบบอ้างอิงนั้นๆเข้าไปที่บัสใดบัสหนึ่ง จากนั้นทำการสร้าง PV CURVE เพื่อหาความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบ โดยทดสอบกับระบบอ้างอิง case IEEE 9 bus, case IEEE 14 bus, case IEEE 39 bus

ผลการทดลองที่ 2.1 ทดสอบกับ IEEE 9 bus system โดยต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของโหลดรวมเข้าไปที่บัสต่างๆ โดยพล็อตแรงดันของบัส 7 เทียบกับโหลดรวมของระบบ



รูปที่ 4.4 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus system

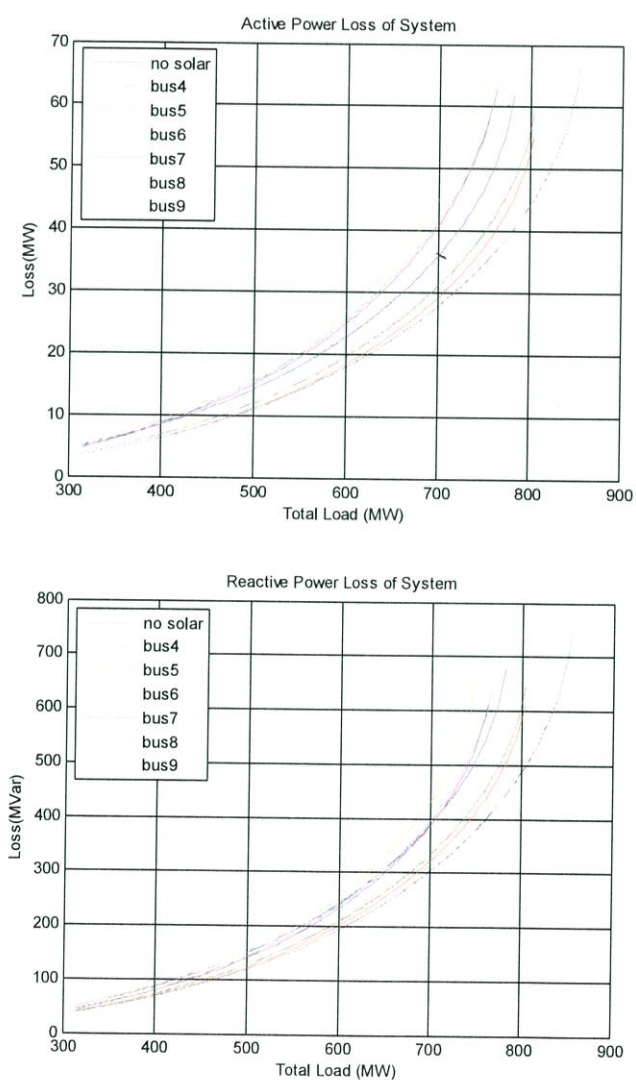


รูปที่ 4.5 กราฟ Load margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus system

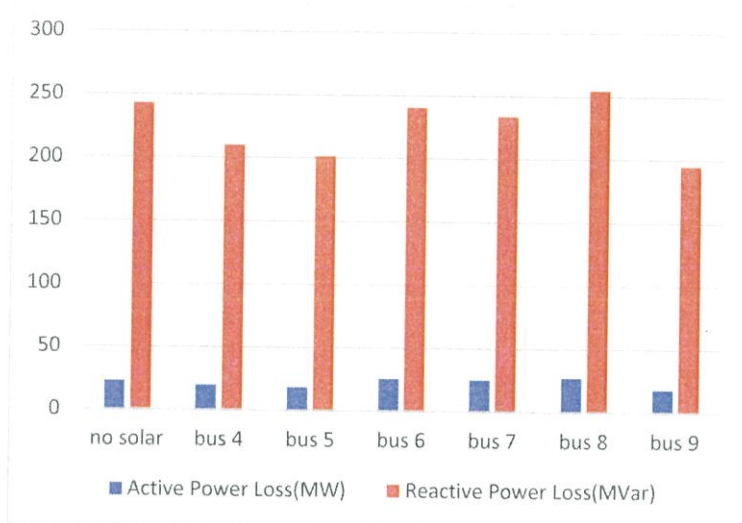
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus system

บัส	โหลดรวม ณ จุดวิกฤต(MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับระบบปกติ(เปอร์เซ็นต์)
4	803.25	488.25	เพิ่มขึ้น 4.73
5	803.25	488.25	เพิ่มขึ้น 4.73
6	765.45	450.45	ลดลง 3.37
7	762.3	447.3	ลดลง 4.05
8	749.7	434.7	ลดลง 6.76
9	853.65	538.65	เพิ่มขึ้น 15.54

(Load margin กรณีไม่ต่อ PV system=466.2 MW)



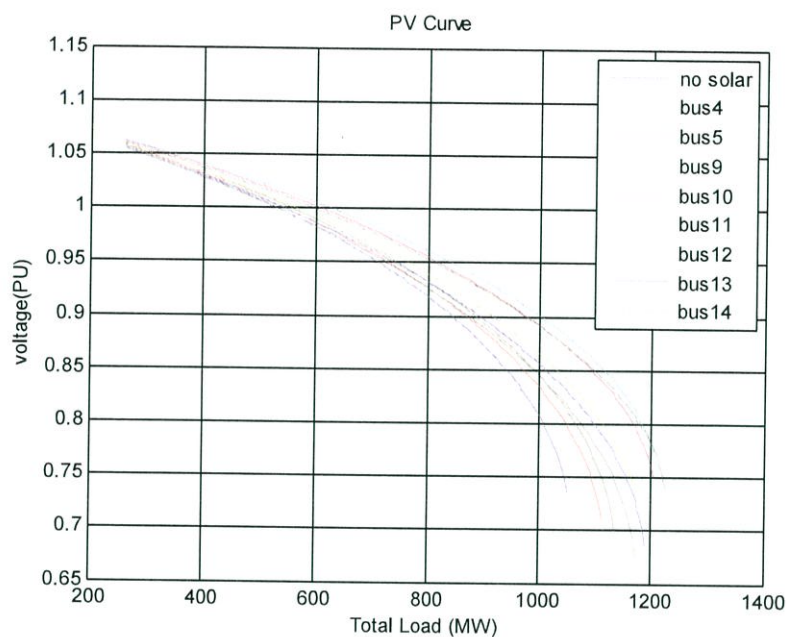
รูปที่ 4.6 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus system



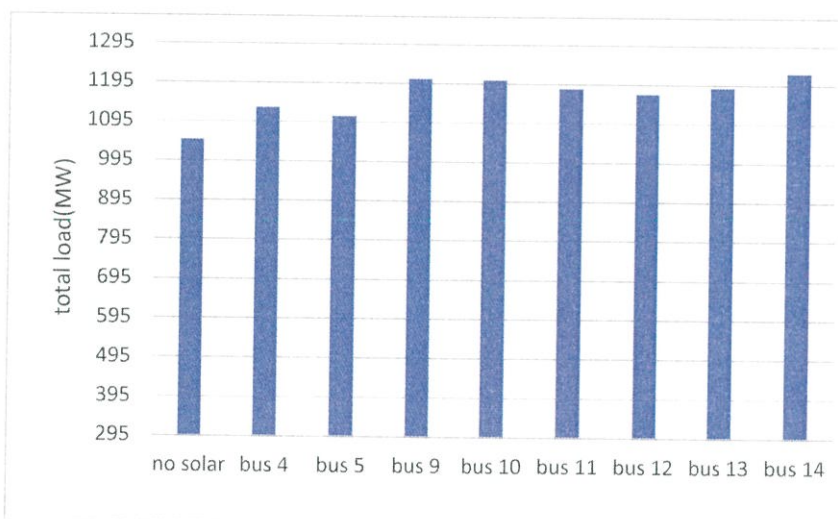
รูปที่ 4.7 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น (ณ โหลดรวมเท่ากับ 600MW) กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าระบบที่บัสต่างๆของ IEEE 9 bus system

จากการทดลองที่ 2.1 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่ บัสต่างๆของ IEEE 9 bus system และสร้าง PV Curve ดังรูปที่ 4.4 พบว่าการต่อเข้าบัสต่างกันจะ ทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเปลี่ยนแปลงต่างกัันดังตารางที่ 4.1 เนื่องจาก ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเปลี่ยนไป ทำให้กำลังสูญเสียรวมของระบบเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.7(ณ โหลดรวมเท่ากับ 600MW) ส่งผลให้ Load Margin ของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังรูปที่ 4.5 และจากการศึกษาพบว่าเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 9 จะทำให้ ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้นมากที่สุดซึ่งเพิ่มขึ้น 15.54 เปอร์เซ็นต์ ดัง ตารางที่ 4.1

ผลการทดลองที่ 2.2 ทดสอบกับ IEEE 14 bus system โดยต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณ 10 เมอร์เซ็นต์ของโหลดรวมเข้าไปที่บัสต่างๆ โดยพล็อตแรงดันของบัส 9 เทียบกับโหลดรวมของระบบ



รูปที่ 4.8 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆ ของ IEEE 14 bus system

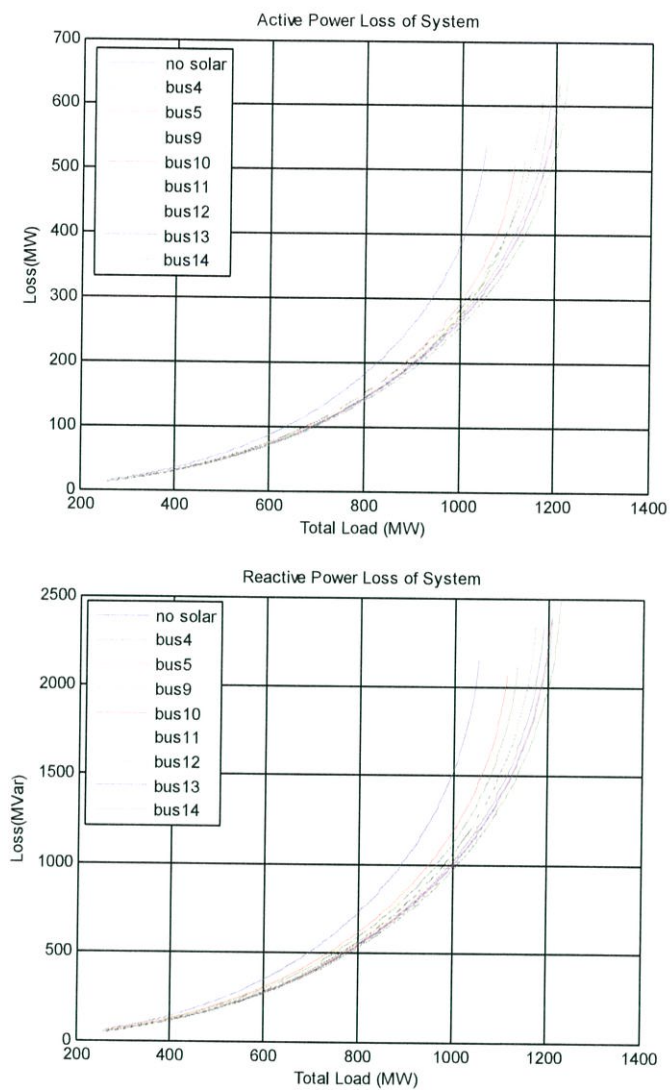


รูปที่ 4.9 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆของ IEEE 14 bus system

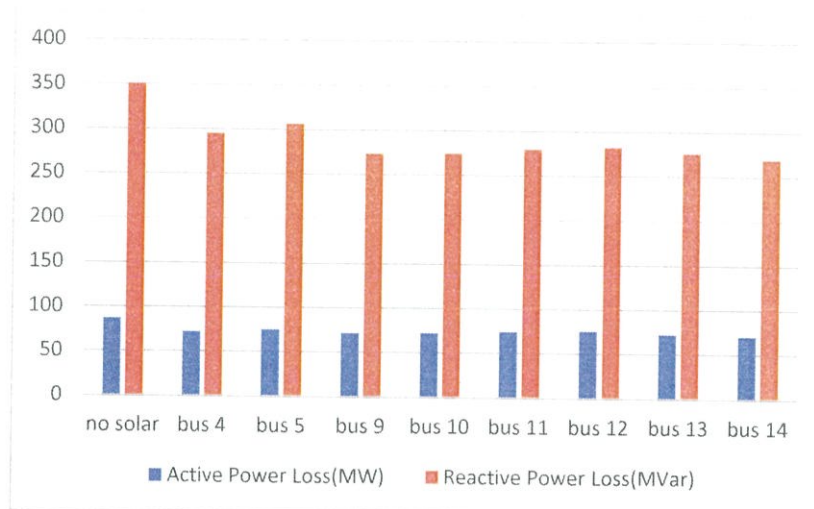
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 14 bus system

บัส	โหลดรวม ณ จุดวิกฤต (MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับระบบปกติ(เปอร์เซ็นต์)
4	1131.83	836.83	เพิ่มขึ้น 10.99
5	1111.11	816.11	เพิ่มขึ้น 8.24
9	1206.94	911.94	เพิ่มขึ้น 20.96
10	1204.35	909.35	เพิ่มขึ้น 20.61
11	1183.63	888.63	เพิ่มขึ้น 17.86
12	1170.68	875.68	เพิ่มขึ้น 16.14
13	1188.81	893.81	เพิ่มขึ้น 18.55
14	1225.07	930.07	เพิ่มขึ้น 23.35

(Load margin กรณีไม่ต่อ PV system=754 MW)



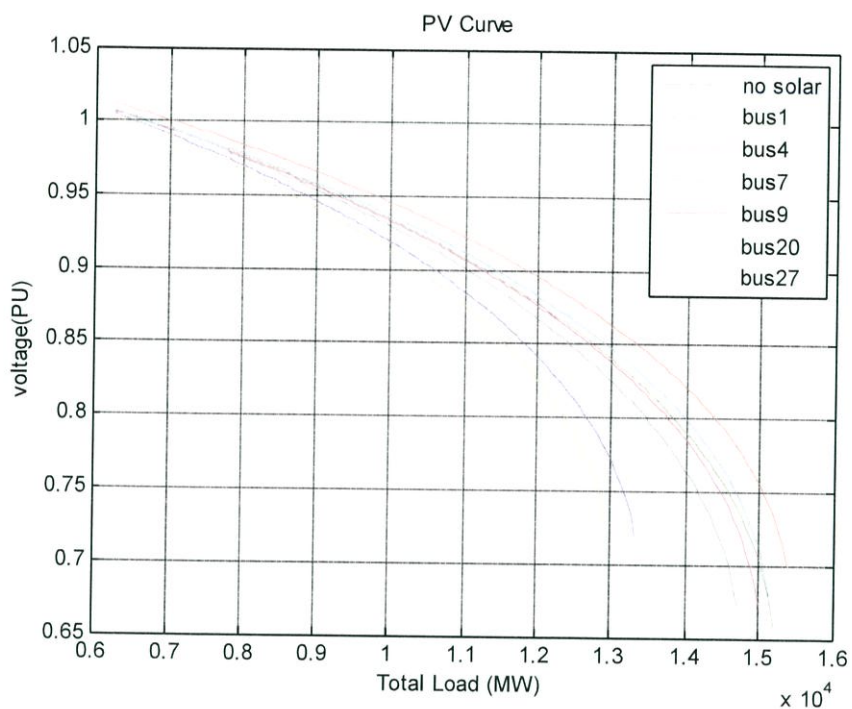
รูปที่ 4.10 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆของ IEEE 14 bus system



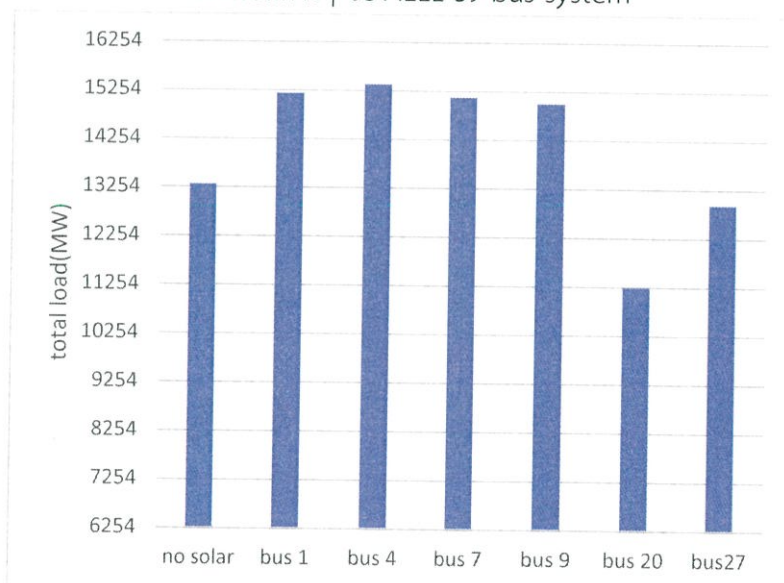
รูปที่ 4.11 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น (ณ โหลดรวม เท่ากับ 600MW) กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัสต่างๆของ IEEE 14 bus system

จากการทดลองที่ 2.2 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่ บัสต่างๆของ IEEE 14 bus system และสร้าง PV Curve ดังรูปที่ 4.8 พบว่าการต่อเข้าบัสต่างกันจะ ทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเปลี่ยนแปลงต่างกัันดังตารางที่ 4.2 เนื่องจาก ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเปลี่ยนไป ทำให้กำลังสูญเสียรวมของระบบเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.11(ณ โหลดรวมเท่ากับ 600MW) ส่งผลให้ Load Margin ของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังรูปที่ 4.9 และจากการศึกษาพบว่าเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 14 จะทำให้ ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้นมากที่สุดซึ่งเพิ่มขึ้น 23.35 เปอร์เซ็นต์ ดัง ตารางที่ 4.2

ผลการทดลองที่ 2.3 ทดสอบกับ IEEE 39 bus system โดยต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณ 10 เมอร์เซ็นต์ของโหลดรวมเข้าไปที่บัสต่างๆ โดยพล็อตแรงดันของบัส 4 เทียบกับโหลดรวมของระบบ



รูปที่ 4.12 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆ ของ IEEE 39 bus system

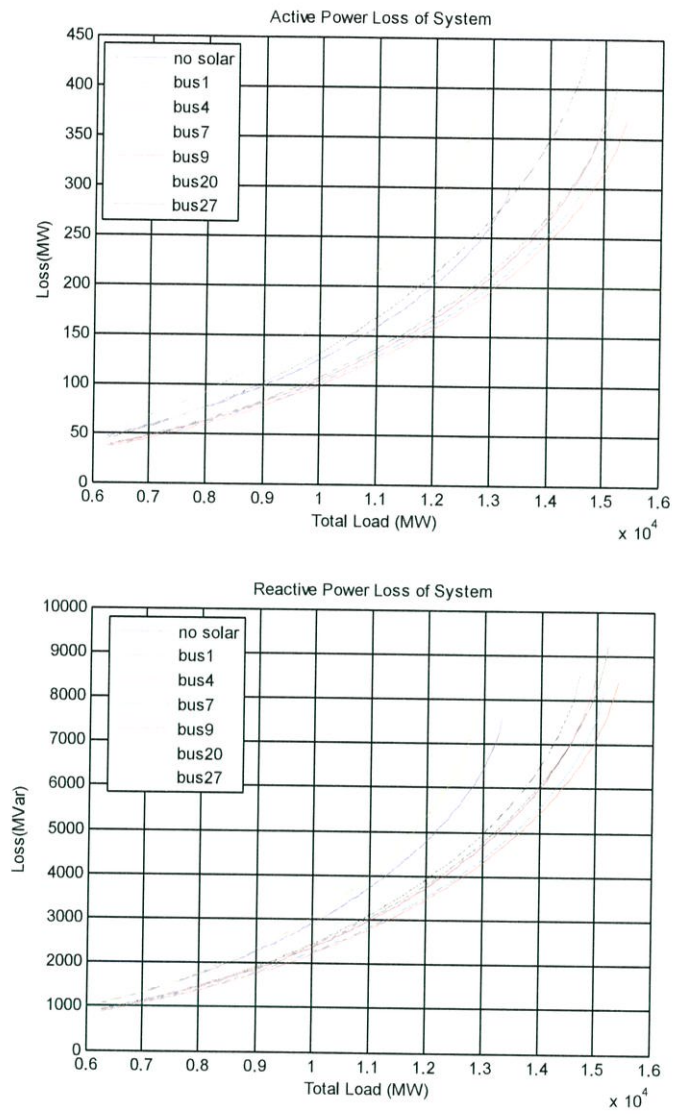


รูปที่ 4.13 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 39 bus system

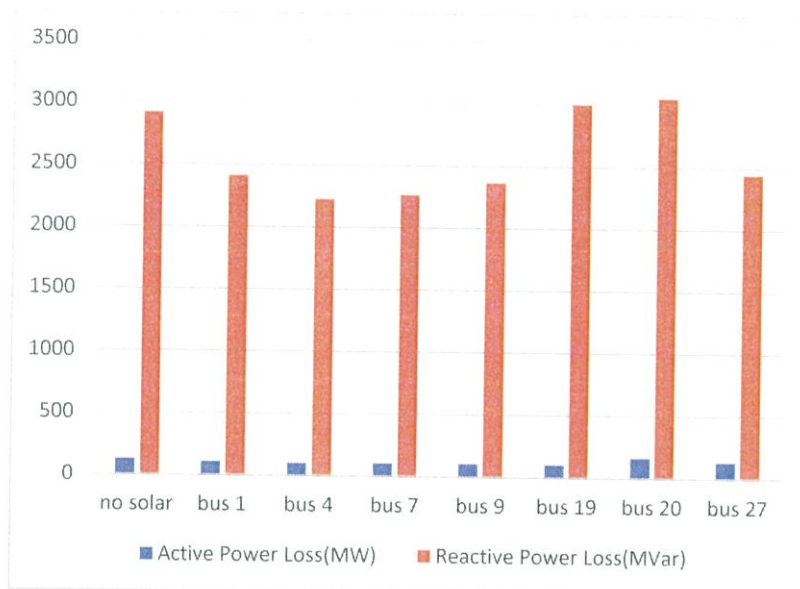
ตารางที่ 4.3 ตารางการเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 39 bus system

บัส	โหลดรวม ณ จุดวิกฤต (MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับระบบปกติ(เปอร์เซ็นต์)
1	15197	8942.8	เพิ่มขึ้น 26.54
4	15385	9130.8	เพิ่มขึ้น 29.2
7	15135	8880.8	เพิ่มขึ้น 25.66
9	15010	8755.8	เพิ่มขึ้น 23.9
20	11257	5002.8	ลดลง 29.21
27	12946	6691.8	ลดลง 5.31

(Load marginกรณีไม่ต่อ PV system=7067 MW)



รูปที่ 4.14 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น
กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้า IEEE 39 bus system



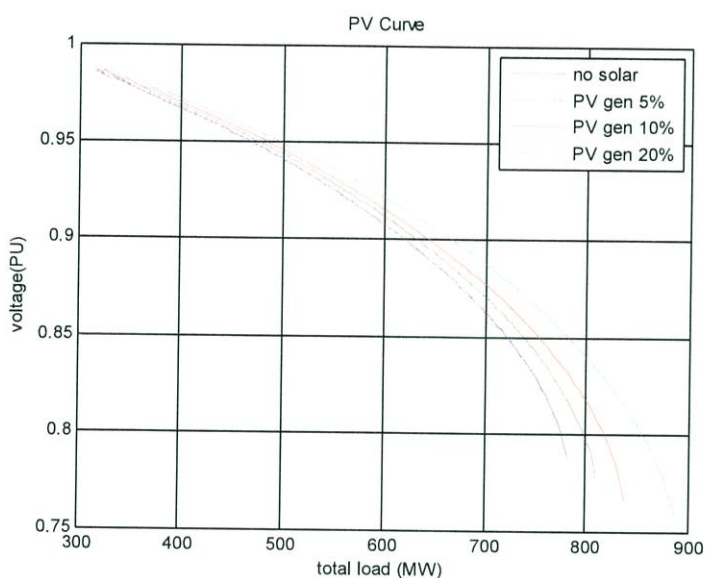
รูปที่ 4.15 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น (ณ โหลดรวมเท่ากับ 10000MW)กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้า IEEE 39 bus system

จากการทดลองที่ 2.3 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆของ IEEE 39 bus system และสร้าง PV Curve ดังรูปที่ 4.12 พบว่าการต่อเข้าบัสที่ต่างกัน จะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเปลี่ยนแปลงต่างกัันดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเปลี่ยนไป ทำให้กำลังสูญเสียรวมของระบบเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.15(ณ โหลดรวมเท่ากับ 10000MW) ส่งผลให้ Load Margin ของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังรูปที่ 4.13 และจากการศึกษาพบว่าเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 4 จะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้นมากที่สุดซึ่งเพิ่มขึ้น 29.2 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.3

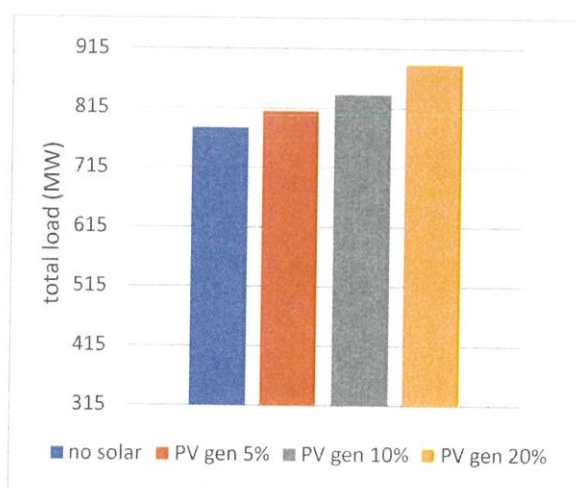
จากผลการทดลองที่ 2 พบว่าแต่ละบัสของระบบไฟฟ้ามีความเหมาะสมในเชิงเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน

4.3 การทดลองที่ 3 เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัสต่างๆพร้อมกันหลายบัส เพื่อตรวจสอบว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อเสถียรภาพของระบบ โดยทดสอบกับระบบอ้างอิง case IEEE 9 bus, case IEEE 14 bus, case IEEE 39 bus (โดยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รวมมีขนาดเท่ากับ 5,10 และ 20 เปอร์เซนต์ของโหลดรวมของระบบอ้างอิงนั้นๆ)

ผลการทดลองที่ 3.1 การต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 5 และ บัส 9 ของ IEEE 9 bus system โดยพล็อตแรงดันบัสที่ 7 เทียบกับโหลดรวม



รูปที่ 4.16 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 5 และบัส 9 จำนวน 5% ,10% และ 20% ของโหลดรวม IEEE 9 bus system

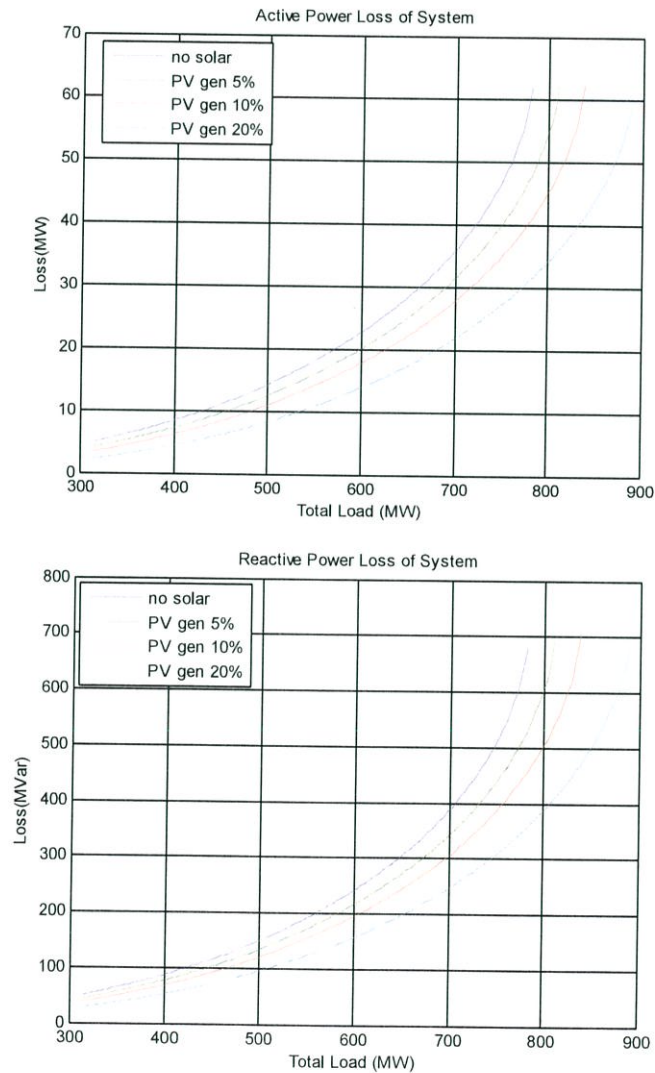


รูปที่ 4.17 กราฟLoad margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่ บัส 5 และบัส 9 ของ IEEE 9 bus system

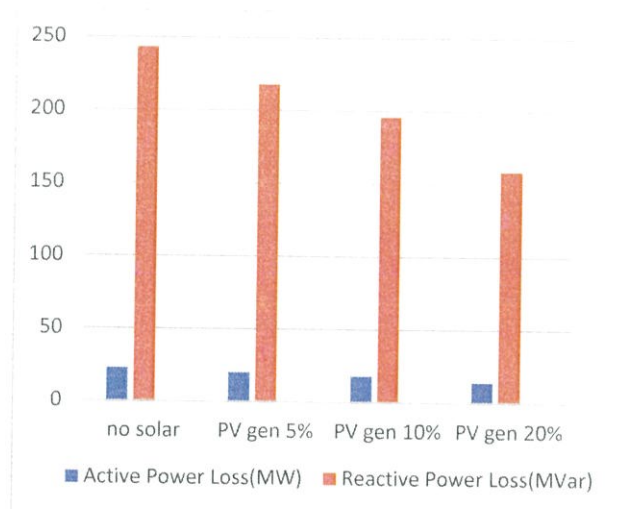
ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่ บัส 5 และบัส 9 ของ IEEE 9 bus system

	โหลดรวม ณ จุดวิกฤต (MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับ ระบบปกติ(เปอร์เซ็นต์)
PV gen 5%	809.5	494.5	เพิ่มขึ้น 6.07
PV gen 10%	837.9	522.9	เพิ่มขึ้น 12.16
PV gen 20%	888.3	573.3	เพิ่มขึ้น 22.97

(Load margin กรณีไม่ต่อ PV system=466.2 MW)



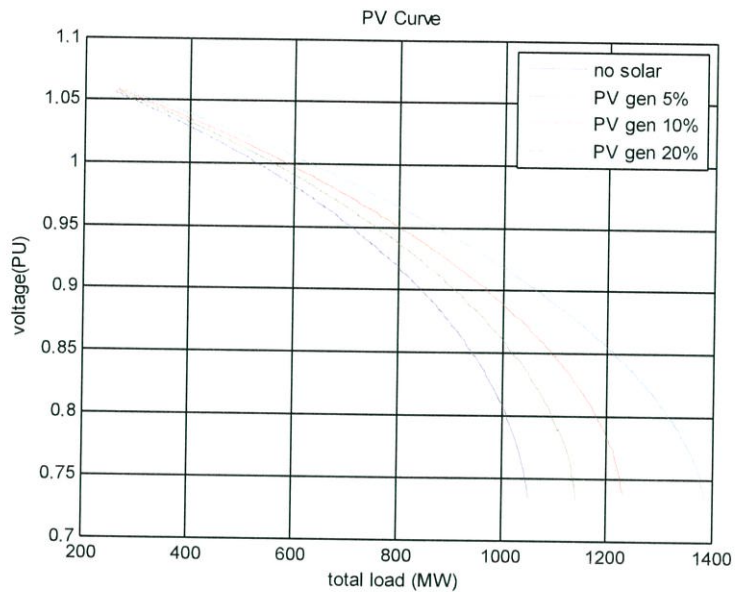
รูปที่ 4.18 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 5 และบัส 9 ของ IEEE 9 bus system



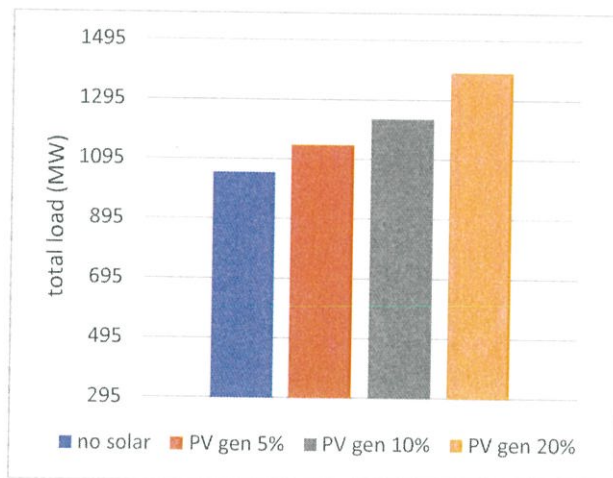
รูปที่ 4.19 กราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 5 และบัส 9 (ณ โหลดรวมเท่ากับ 600MW)

จากการทดลองที่ 3.1 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆพร้อมกันหลายบัสของระบบอ้างอิง IEEE 9 bus system และสร้าง PV Curve ดังรูปที่ 4.16 พบว่ายิ่งปริมาณของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบมากขึ้นความสามารถของระบบในการรองรับโหลดสูงสุดก็จะเพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 4.4 เนื่องจากว่าไม่ต้องส่งกำลังไฟฟ้าจากระยะทางไกลทำให้กำลังสูญเสียรวมของระบบมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.19

ผลการทดลองที่ 3.2 การต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส10,13 และบัส14 ของ IEEE 14 bus system โดยพล็อตแรงดันบัสที่ 9 เทียบกับโหลดรวม



รูปที่ 4.20 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส10,13และบัส 14 จำนวน 5% ,10%และ 20% ของโหลดรวม IEEE 14 bus system

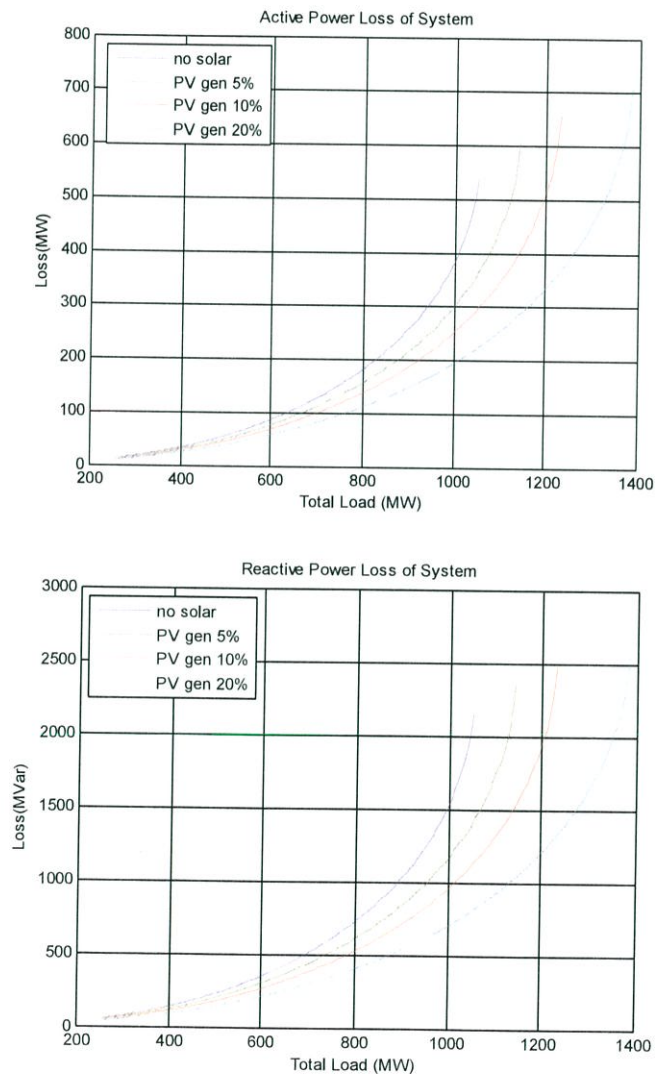


รูปที่ 4.21 กราฟ Load margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าระบบที่ บัส10 ,13 และบัส 14ของ IEEE 14 bus system

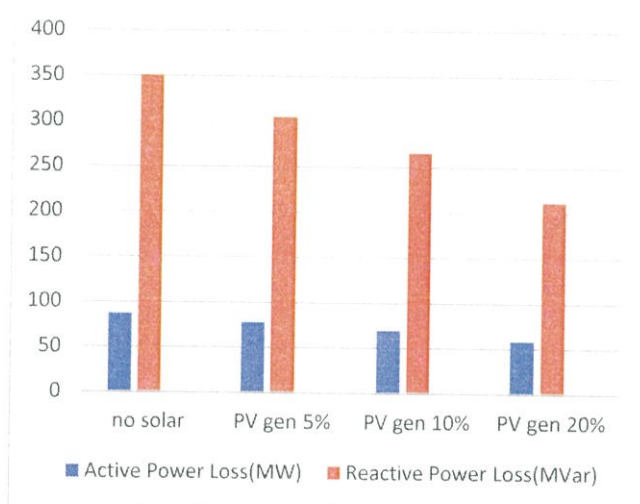
ตารางที่ 4.5 ตารางการเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่ บัส 10 ,13 และบัส 14 ของ IEEE 14 bus system

	โหลตรวม ณ จุดวิกฤต (MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับระบบปกติ(เปอร์เซ็นต์)
PV gen 5%	1142.19	847.19	เพิ่มขึ้น 8.88
PV gen 10%	1230.25	935.25	เพิ่มขึ้น 17.28
PV gen 20%	1385.65	1090.65	เพิ่มขึ้น 32.09

(Load margin กรณีไม่ต่อ PV system=753.95 MW)



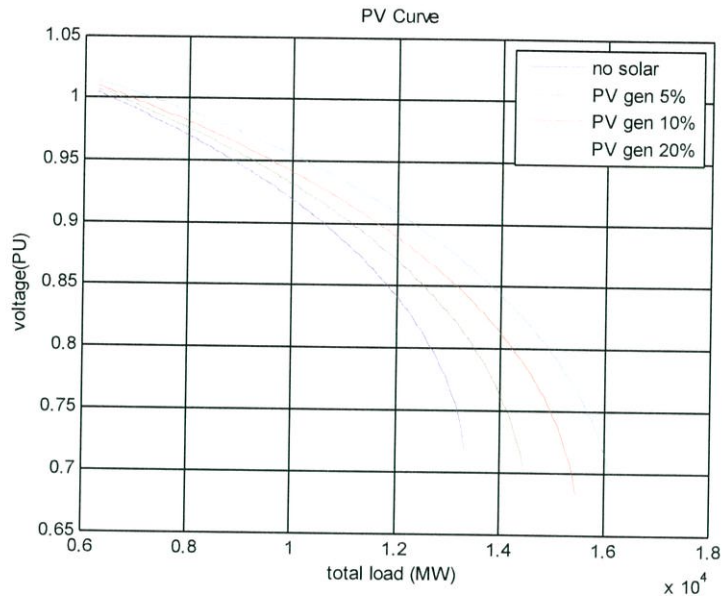
รูปที่ 4.22 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลตรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 10,13 และบัส 14 ของ IEEE 14 bus system



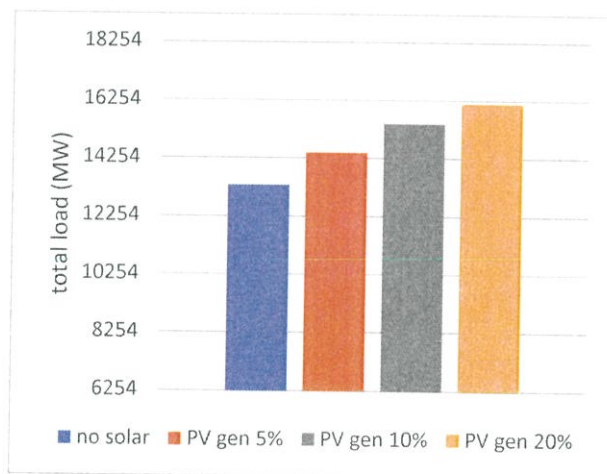
รูปที่ 4.23 กราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 10,13 และ 14 (ณ โหลดรวมเท่ากับ 600MW)

จากการทดลองที่ 3.2 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆพร้อมกันหลายบัสของระบบอ้างอิง IEEE 14 bus system และสร้าง PV Curve ดังรูปที่ 4.20 พบว่ายิ่งปริมาณของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบมากขึ้นความสามารถของระบบในการรองรับโหลดสูงสุดก็จะเพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 4.5 เนื่องจากว่าไม่ต้องส่งกำลังไฟฟ้าจากระยะทางไกลทำให้กำลังสูญเสียรวมของระบบมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.23

ผลการทดลองที่ 3.3 การต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 4,8,16,21,24 และบัส 26 ของ IEEE 39 bus system โดยพล็อตแรงดันบัสที่ 4 เทียบกับโหลดรวม



รูปที่ 4.24 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 4,8,16,21,24 และบัส 26 จำนวน 5% ,10% และ 20% ของโหลดรวม IEEE 39 bus system

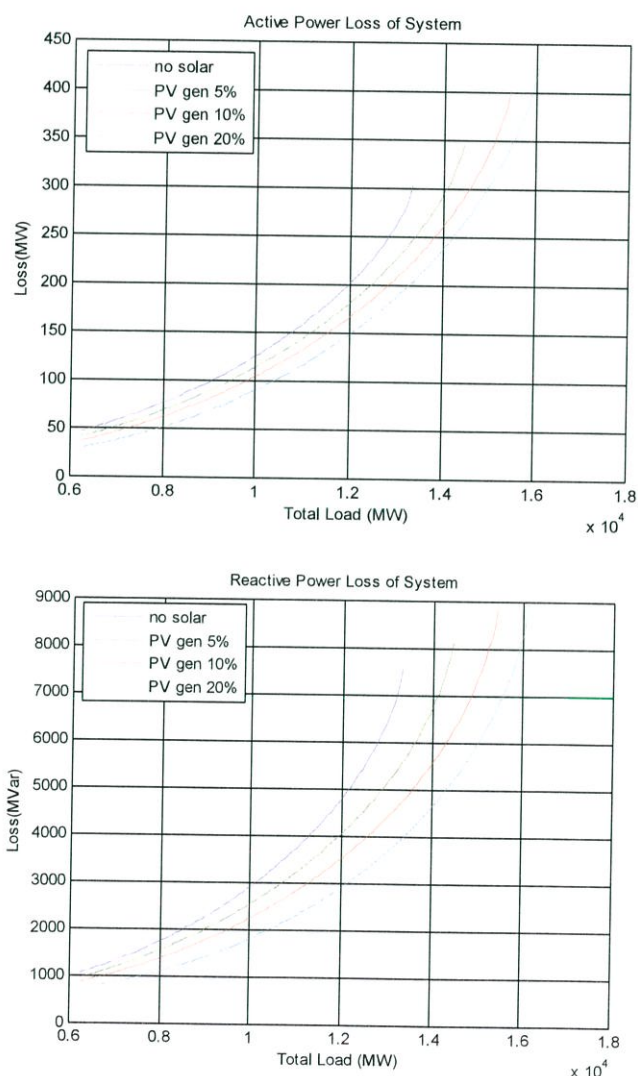


รูปที่ 4.25 กราฟ Load margin ของระบบ เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่ บัส 4,8,16,21,24 และบัส 26 ของ IEEE 39 bus system

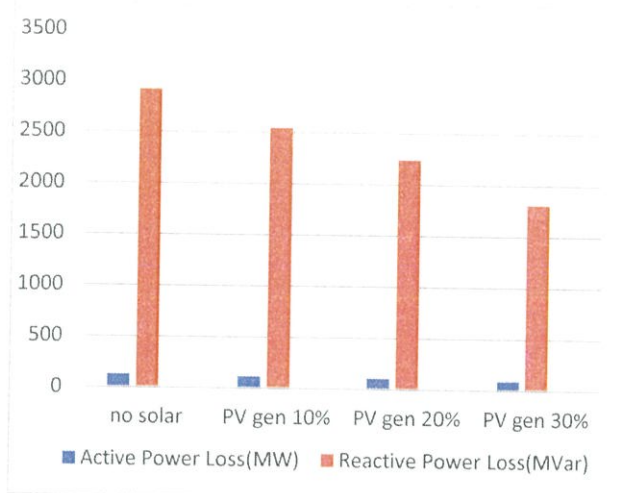
ตารางที่ 4.6 ตารางการเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่ บัส4,8,16,21,24 และบัส 26 ของ IEEE 39 bus system

	โหลดรวม ณ จุดวิกฤต (MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับระบบปกติ (เปอร์เซ็นต์)
PV gen 5%	14447	8193	เพิ่มขึ้น 8.45
PV gen 10%	15447	9193	เพิ่มขึ้น 15.96
PV gen 20%	16135	9881	เพิ่มขึ้น 21.12

(Load margin กรณีไม่ต่อ PV system=7067 MW)



รูปที่ 4.26 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้น กรณีต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส4,8,16,21,24 และบัส 26 ของ IEEE 39 bus system

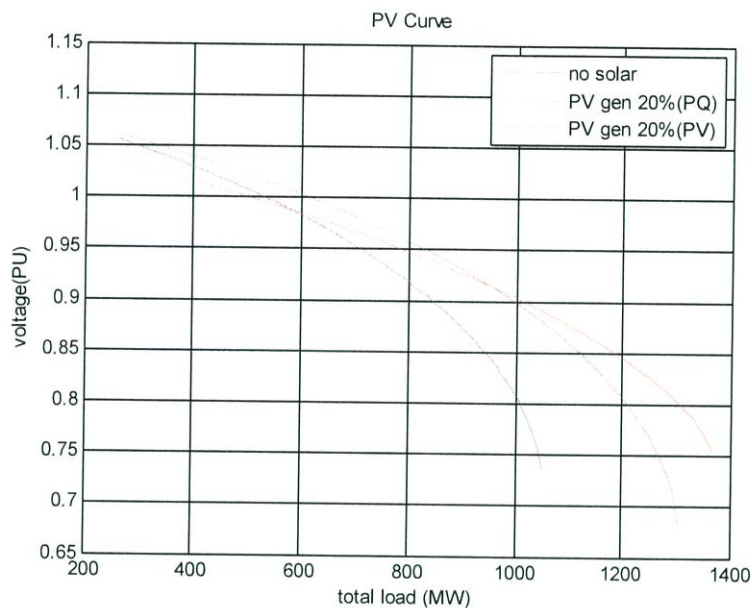


รูปที่ 4.27 กราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อต่อของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 4,8,16,21,24 และบัส 26 (ณ โหลดรวมเท่ากับ 10000MW)

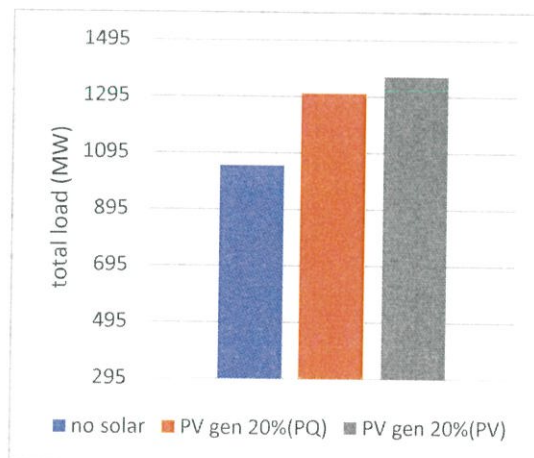
จากการทดลองที่ 3.3 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆพร้อมกันหลายบัสของระบบอ้างอิง IEEE 39 bus system และสร้าง PV Curve ดังรูปที่ 4.24 พบว่ายิ่งปริมาณของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบมากขึ้นความสามารถของระบบในการรองรับโหลดสูงสุดก็จะเพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 4.6 เนื่องจากว่าไม่ต้องส่งกำลังไฟฟ้าจากระยะทางไกลทำให้กำลังสูญเสียรวมของระบบมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.27

จากผลการทดลองที่ 3 พบว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบดีขึ้น

4.4 การทดลองที่ 4 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปในระบบไฟฟ้าโดย ทำการศึกษาถึงการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยให้บัสแสดงพฤติกรรมเป็นชนิด PQ และ ชนิด PV เพื่อศึกษาผลกระทบจากชนิดของบัสที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดย ทดสอบกับระบบ IEEE 14 bus โดยเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาด 20 เมอร์เซ็นต์ของโหลดรวมทั้งหมด เชื่อมต่อเข้าไปที่บัส 14 จากนั้นพล็อตแรงดันของบัส 9 เทียบกับ โหลดรวมของระบบ



รูปที่ 4.28 กราฟเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 14 ของ IEEE 14 bus system

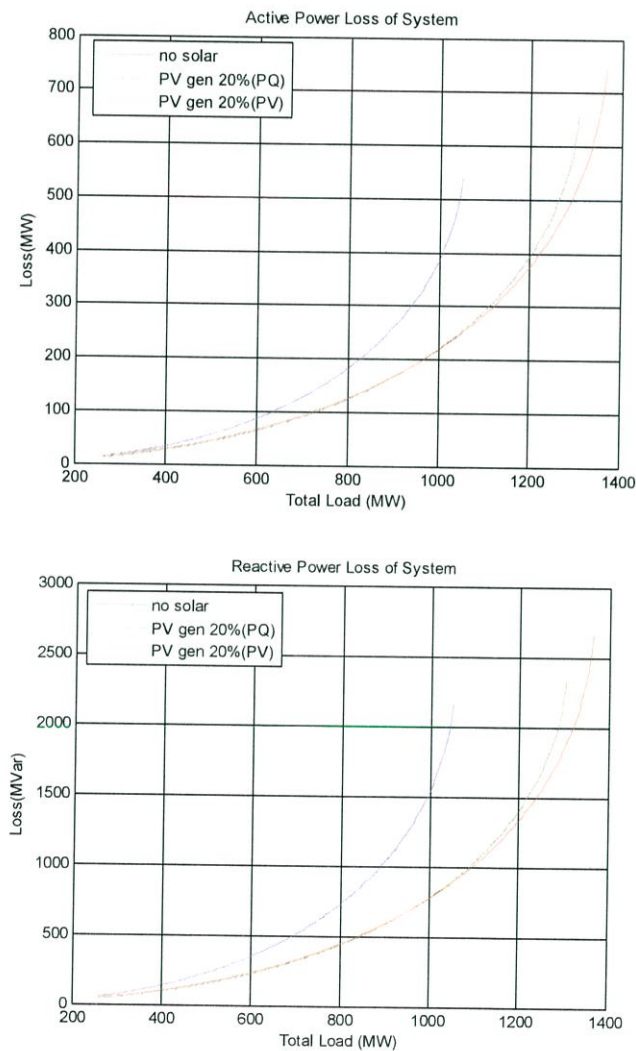


รูปที่ 4.29 กราฟLoad margin ของระบบเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัส 14 ของIEEE 14 bus system

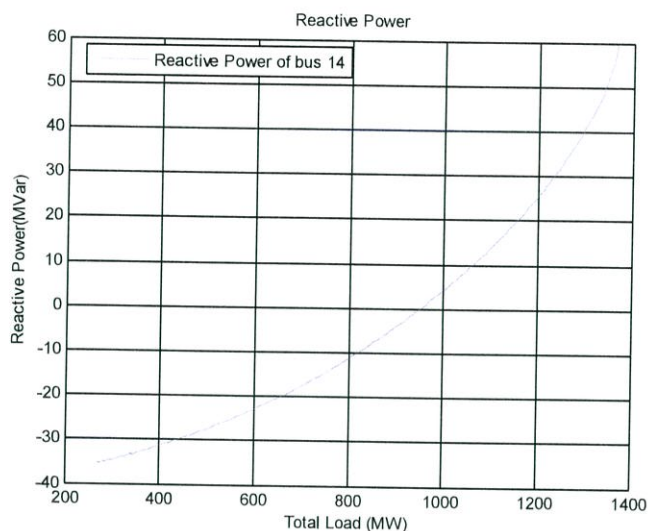
ตารางที่ 4.7 ตารางการเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัส 14 ของ IEEE 14 bus system

	โหลดรวม ณ จุดวิกฤต (MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับ ระบบปกติ(เปอร์เซ็นต์)
PV gen 20%(PQ)	1305.4	1010.4	เพิ่มขึ้น 34
PV gen 20%(PV)	1364.9	1069.9	เพิ่มขึ้น 41.9

(Load margin กรณีไม่ต่อ PV system=754 MW)



รูปที่ 4.30 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อโหลดรวมของระบบเพิ่มขึ้นเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 14 ของ IEEE 14 bus system



รูปที่ 4.31 กราฟปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนของบัส 14 ซึ่งมีการต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 14 (บัสชนิด PV)

จากการทดลองที่ 4 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับบัส 14 ของระบบอ้างอิง IEEE 14 bus โดยมีขนาด 20 เปอร์เซ็นต์ของโหลดรวม แล้วเปรียบเทียบในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชนิด PQ Type และชนิด PV Type กับกรณีที่ระบบที่ไม่มีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็น PV Type ทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้น 41.9 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชนิด PQ Type ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้น 34 เปอร์เซ็นต์ ดังรูป 4.28 และตารางที่ 4.7 โดยกรณีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชนิด PV Type จะต้องมีอุปกรณ์ช่วยจ่ายและรับกำลังเสมือนให้กับระบบดังรูปที่ 4.31 เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ตามที่ระบบต้องการ สรุปผลการทดลอง ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด PV model จะมีความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดได้มากกว่า PQ model

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว แผน PDP ฉบับปรับปรุงล่าสุดปี 2555 ประเทศไทยมีแผนที่จะขยายการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยการเพิ่มโรงไฟฟ้าใหม่และปรับปรุงโรงไฟฟ้าเดิมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังมีแผนที่จะเพิ่มสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนภายในระบบโดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่และการทำงานก็แตกต่างจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อน การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จึงยังมีไม่มากนัก เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะคงตัว โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการทำการทดลอง และส่วนการวิเคราะห์การทดลอง โดยใช้ระบบอ้างอิง IEEE 9 bus, IEEE 14 bus, IEEE 39 bus เป็นระบบทดสอบ

ในส่วนแรกเริ่มจากการออกแบบโปรแกรมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้วิธีนิวตัน ราบสันและเทคนิค CP FLOW (Continuation power flow) ในการสร้าง PV Curve เพื่อใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ระบบ ส่วนที่สองเป็นการทำการทดลอง ซึ่งในกรณีศึกษาที่หนึ่ง พบว่าการเชื่อมต่อ PV system ที่ตำแหน่งต่างกันจะส่งผลให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดต่างกันด้วย (Location study) เนื่องจากการติดตั้งที่ตำแหน่งต่างกันส่งผลให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสายส่งต่างกันทำให้ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งต่างกัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้ากำลังจะมีบัสที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมต่อ PV system ซึ่งการเชื่อมต่อที่จุดที่เหมาะสมที่สุดจะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดเพิ่มขึ้นมากที่สุดเช่นกัน และในส่วนของกรณีศึกษาที่สอง เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PV system ในระบบให้มากขึ้นก็จะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดเพิ่มขึ้น ในกรณีศึกษาสุดท้ายพบว่า การเชื่อมต่อ PV system เข้ากับระบบไฟฟ้าโดยใช้ PV model จะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีเชื่อมต่อ PV system เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ PQ model

เนื่องจากในกรณีของ PV model PV system จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) เข้าสู่ระบบได้มากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมเป็นแบบจำลองอย่างง่าย
2. สามารถศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้นได้ โดยการเพิ่มคำสั่งโปรแกรม
3. สามารถปรับปรุงการทำงานของโปรแกรมให้มีความละเอียดของคำตอบของการคำนวณให้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก<http://www.chumphon.kmitl.ac.th/me/images/stories/km/km002.pdf>
- [2] Weidong Xiao , Dunford, W.G. and Capel, A. “A novel modeling method for photovoltaic cells” **IEEE Conf.**, pp. 1950- 1956 Vol.3,June 2004.
- [3] Wang Yi-Bo , Wu Chun-Sheng , Liao Hua and Xu Hong-hua. “Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system”, **IEEE International Conference**,pp.1-6,2008.
- [4] R.Bergen and Vijay Vittal. **POWER SYSTEM ANALYSIS .2nd** ed. New Jersey. Prentice-Hall, Inc. 1986, 2000
- [5] Hsiao-Dong Chiang, Alexander J. Flueck, Kirit S. Shah and Neal Balu. “CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations,” **IEEE Trans. on Power Systems**, Vol.10,No.2,May 1995, pp. 623- 634.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความวิชาการ

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Voltage Stability Analysis of Grid-Connected PV Power System

ธนพนธ์ จิระพิบูลย์พันธ์ ธนาภา เกตุศรีคนกุล ธวัชชัย เรืองรอง และ ธวัชชัย วสุธาวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ถลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-mail: thawatchai_ru@outlook.com

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และชนิดของเสถียรภาพที่ทำการศึกษาวิเคราะห์คือเสถียรภาพของแรงดัน เนื่องจากมีผลต่อระบบมากที่สุดโดยเลือกใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันและวิธี CPFLOW ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อทำการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเงื่อนไขด้านองค์ประกอบต่างกัน

คำสำคัญ: เสถียรภาพแรงดัน, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์,

PV curve, Load Margin

Abstract

This thesis emphasizes on the study of voltage stability which is one of the most important aspects in power system. Based on Newton-Raphson method and Continuation power flow (CPFLOW) technique, we developed a simulation program which can effectively generate PV curves of grid-connected photo voltaic power system and compute system's load margins. By using this simulation program and IEEE case studies, we conducted a research on the characteristics of load margins under varied conditions such as different installed locations of PV system, and different levels of solar power injection.

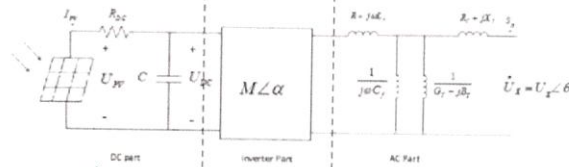
Keywords: voltage stability, PV Power System, PV curve, Load Margin

1. บทนำ

เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จึงเลือกใช้วิธีนิวตันราฟสันและเทคนิค CPFLOW เพื่อสร้าง PV Curve ในการวิเคราะห์ load margin และหาความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบ อีกทั้งยังศึกษาผลกระทบในระบบไฟฟ้าที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

สามารถเขียนแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ 1. ส่วนไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกันจะเกิดแรงดัน V_{PV} , กระแส I_{PV} และ ได้กำลังไฟฟ้า P_{PV} ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{dI}{dV_{V=mpp}} = - \frac{\frac{I_{sat}}{V_t} e^{\frac{V_{mpp}+I R_s}{V_t}}}{1 + \frac{I_{sat} R_s}{V_t} e^{\frac{V_{mpp}+I R_s}{n}}}$$
 (2.1)

เมื่อ N_s คือจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมอยู่ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ N_{ss} คือ จำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน และ N_{pp} คือจำนวนชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนานกัน

$$\left. \begin{aligned} U_{PV} &= N_s N_{ss} V_{cell} \\ I_{PV} &= N_{pp} I_{cell} \\ P_{PV} &= U_{PV} I_{PV} \end{aligned} \right\}$$
 (2.2)

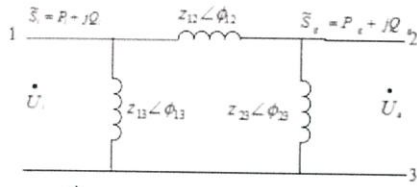
2. ส่วนอินเวอร์เตอร์

ในส่วนของอินเวอร์เตอร์สามเฟสหลังจากทำการแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จะได้แรงดันดังสมการที่ 2.17

$$U_i = U_i < \alpha = \frac{\sqrt{2}}{4} M U_{PV} < \alpha$$
 (2.3)

3. ส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับส่วนไฟฟ้ากระแสสลับจะมีส่วนของฟิลเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นแบบ Y/Δ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.2 จะได้กำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดังสมการ

$$P_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos\phi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \cos\phi_{13} - \frac{U_g}{z_{12}} \cos(\theta_g - \alpha - \phi_{12}) \right] \quad (2.4)$$

$$Q_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin\phi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \sin\phi_{13} - \frac{U_g}{z_{12}} \sin(\theta_g - \alpha - \phi_{12}) \right] \quad (2.5)$$

$$P_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos(\alpha - \theta_g - \phi_{12}) + \frac{U_i}{z_{12}} \cos\phi_{12} - \frac{U_g}{z_{23}} \cos\phi_{23} \right] \quad (2.6)$$

$$Q_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin(\alpha - \theta_g - \phi_{12}) + \frac{U_i}{z_{12}} \sin\phi_{12} - \frac{U_g}{z_{23}} \cos\phi_{23} \right] \quad (2.7)$$

2.2 การคำนวณหาแวลูโพล์ด้วยวิธีนิวตัน ราฟสัน

เริ่มจากการคาดเดาค่าเริ่มต้นของตัวแปรไม่ทราบค่าทั้งหมด จากสมการ สมดุลของแต่ละบัส และทำให้เป็นระบบสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.2.1 ตัวแปรสถานะ

ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งหมดในที่นี้คือขนาดและมุมของแรงดันที่โหนดบัส และมุมของแรงดันที่บัสแหล่งจ่าย ถูกเรียงในรูปของ

$$\text{เวกเตอร์} \begin{bmatrix} \theta_{pv} \\ \theta_{pq} \\ |V|_{pq} \end{bmatrix}$$

2.2.2 ฟังก์ชันจาโคเบียน

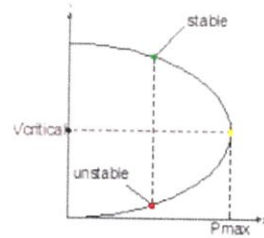
J คือเมตริกซ์ของอนุพันธ์ย่อย (partial derivatives matrix) ที่รู้จักกันว่า

Jacobian

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.3 เสถียรภาพทางแรงดัน

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถรักษาแรงดันในทุกๆบัสให้อยู่ในช่วงที่อมรับได้ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและหลังจากการถูกรบกวนโดยการรบกวนขนาดเล็กหรือการรบกวนขนาดใหญ่ (Small and Large Disturbance)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax)

กับแรงดันวิกฤต (Vcrit)

จากกราฟจุดที่แสดงจุดรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือโหนดสูงสุดเรียกว่าจุด Maximum System ถ้าเพิ่มโหนดมากกว่านี้แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจนไม่สามารถควบคุมได้อีก ในกราฟจะมีจุดโหนดสั่งการ 2 จุดคือ Stable กับ Unstable ซึ่งควรสั่งการที่จุด Stable point เนื่องจากเป็นจุดที่สามารถควบคุมแรงดันได้ กระแสไฟฟ้าต่ำ และมีความเป็นเสถียรภาพของระบบ

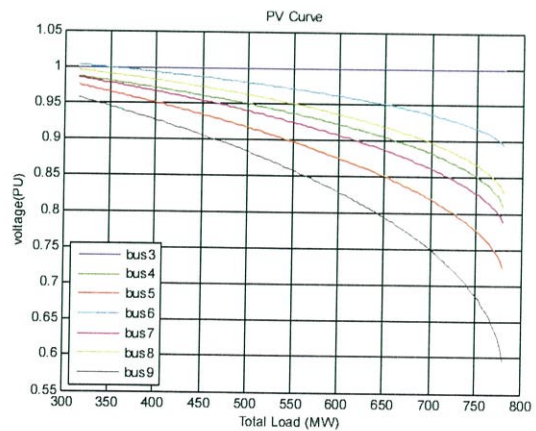
2.4 CPFLOW

CPFLOW เป็นเครื่องมือที่ครอบคลุมสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของระบบกำลังไฟฟ้าในช่วงสภาวะคงตัว (Steady state) การติดตามเส้นโค้งคำตอบเบื้องต้นประกอบด้วย 4 ประการ

1. การกำหนดตัวแปร (Parameterization) เป็นการระบุค่าของแต่ละตัวบนเส้นโค้งคำตอบ
2. พรีดิคเตอร์ (Predictor) เป็นการหาจุดประมาณสำหรับคำตอบตัวถัดไป
3. คอลเรคเตอร์ (Corrector) เป็นการหาที่แท้จริงที่อยู่บนเส้นโค้งคำตอบโดยใช้วิธี นิวตัน ราฟสัน
4. การควบคุมความกว้างสเต็ป (Step length control) การควบคุมความกว้างสเต็ปสามารถควบคุมให้เป็นค่าคงที่ได้

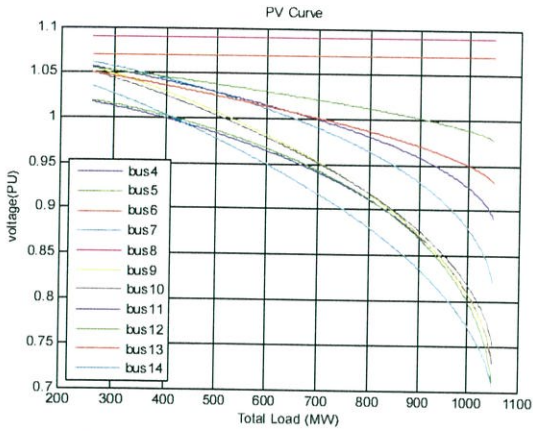
3. การออกแบบการทดลอง

การทดลองที่ 1 ทำการสร้าง PV CURVE โดยใช้เทคนิค CPFLOW เพื่อหา load margin ของระบบ



รูปที่ 3.1 กราฟเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า

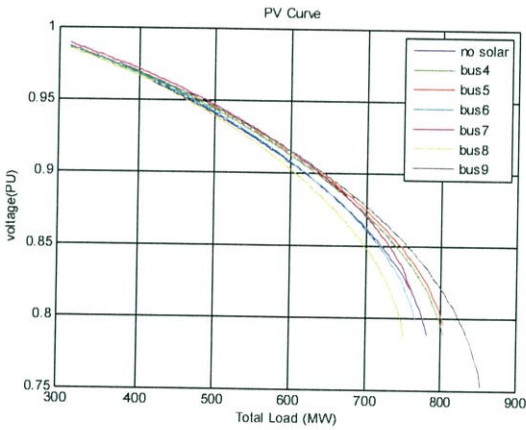
IEEE 9 bus system



รูปที่ 3.2 กราฟเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า

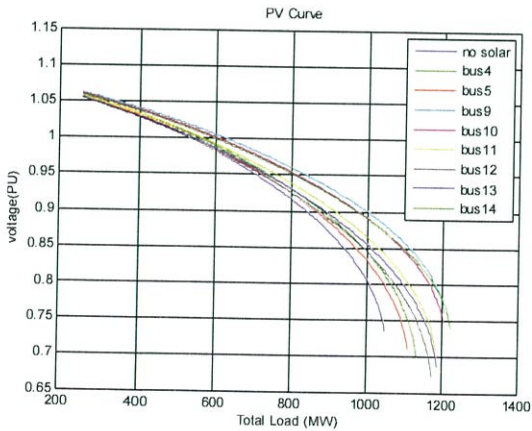
IEEE 14 bus system

การทดลองที่ 2 ทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาด 10% ของโหลรวมของระบบอ้างอิงนั้นๆเข้าไปที่บัสใดบัสหนึ่ง



รูปที่ 3.3 กราฟเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้า

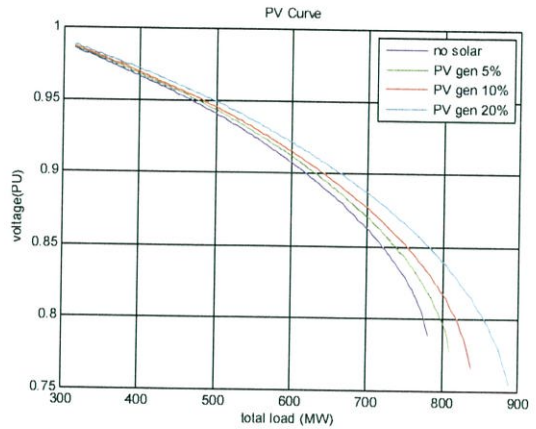
พลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus system



รูปที่ 3.4 กราฟเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้า

พลังงานแสงอาทิตย์ เข้าที่บัสต่างๆ ของ IEEE 14 bus system

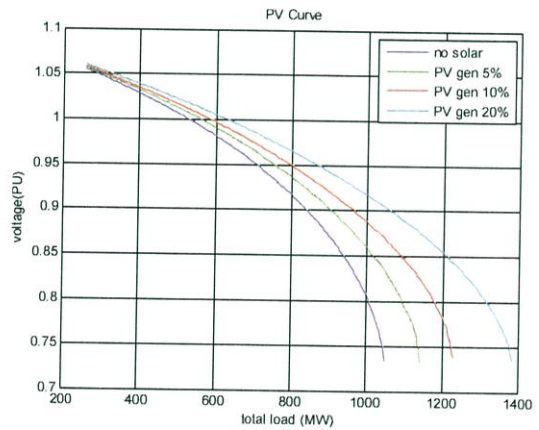
การทดลองที่ 3 เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปที่บัสต่างๆพร้อมกันหลายบัสเพื่อตรวจสอบว่ามีผลอย่างไรต่อเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 3.5 กราฟเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้า

พลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 5 และบัส 9 จำนวน 5%, 10% และ 20% ของ

โหลรวมของระบบ IEEE 9 bus system

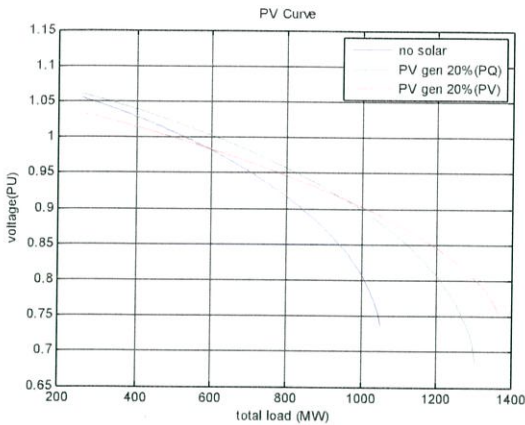


รูปที่ 3.6 กราฟเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้า

พลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 10, 13 และบัส 14 จำนวน 5%, 10% และ 20%

ของโหลรวมของระบบ IEEE 14 bus system

การทดลองที่ 4 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทำการศึกษาผลกระทบจากชนิดของบัสที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แสดงพฤติกรรมเป็นชนิด PQ model และ ชนิด PV model



รูปที่ 3.7 กราฟเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้า

พลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 14 ของ IEEE 14 bus system

ตารางที่ 3.1 ตารางการเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัส 14 ของ IEEE 14 bus system

	โหลดรวม ณ จุดวิกฤต (MW)	Load margin (MW)	Load margin เมื่อเทียบกับระบบปกติ(เปอร์เซ็นต์)
PV gen 20%(PQ)	1305.4	1010.4	เพิ่มขึ้น 34
PV gen 20%(PV)	1364.9	1069.9	เพิ่มขึ้น 41.9

(Load margin กรณีไม่ต่อ PV system=754 MW)

4.สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง พบว่าการเชื่อมต่อ PV system ที่ตำแหน่งต่างกันจะส่งผลให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดต่างกันด้วย (Location study) เนื่องจากการติดตั้งที่ตำแหน่งต่างกันทำให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสายส่งต่างกันทำให้ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งต่างกันด้วย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้ากำลังจะมีบัสที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมต่อ PV system ซึ่งการเชื่อมต่อที่จุดที่เหมาะสมที่สุดจะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดเพิ่มขึ้นมากที่สุดเช่นกัน และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PV system ในระบบให้มากขึ้นก็จะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดเพิ่มขึ้น และในกรณีเชื่อมต่อ PV system เข้ากับระบบไฟฟ้าโดยใช้ PV model จะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีเชื่อมต่อ PV system เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ PQ model เนื่องจาก PV model จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) เข้าสู่ระบบได้มากกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร. วรศม์ สุอำพัน อาจารย์ที่ปรึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตรฉบับนี้ และได้กรุณาตรวจแก้ไข จนทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งถึงพระคุณ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวมาแล้วไม่ได้กล่าว หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.chumphon.kmitl.ac.th/me/images/stories/km/km002.pdf>
- [2] Weidong Xiao , Dunford, W.G. and Capel, A. “A novel modeling method for photovoltaic cells” IEEE Conf., pp. 1950- 1956 Vol.3,June 2004.
- [3] Wang Yi-Bo , Wu Chun-Sheng , Liao Hua and Xu Hong-hua. “Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system”, IEEE International Conference,pp.1-6,2008.
- [4] R.Bergen and Vijay Vittal. POWER SYSTEM ANALYSIS .2nd ed. New Jersey. Prentice-Hall, Inc. 1986, 2000
- [5] Hsiao-Dong Chiang, Alexander J. Flueck, Kirit S. Shah and Neal Balu. “CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations,” IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10,No.2,May 1995, pp. 623- 634



นาย ชนพนธ์ จิระพิบูลย์พันธ์
จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา:
โรงเรียนกัลยาณีศรีธรรมราช



นางสาว ชนภา เกตุรัตน์กุล
จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา:
โรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปทุมวัน



นาย ชววิชัย เรืองรอง
จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา:
โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว



นาย ชววิชัย วสุธารัตน์
จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา:
โรงเรียนอมาตย์พานิชนุกูล

ภาคผนวก ข

DATASHEET

GE Energy

GE 1 MW Brilliance* Solar Inverter

fact sheet

Introduction

GE Energy's 1 MW Brilliance Solar Inverter, a grid tie solar inverter, is the latest evolution of renewables power electronics designed with the heritage of GE's proven wind turbine control design. Building on GE's expertise as a leader in the wind industry and decades of experience in controls for a wide range of utility applications, GE will soon be offering the latest power conversion technology for your large-scale solar applications.

Technical Description

Designed specifically for multi-megawatt solar projects, GE's Brilliance Solar Inverter is UL508C certified and optimized for direct connection to the grid via a Medium Voltage Transformer. With a standard voltage output of 480 VAC, GE's solar inverter requires no additional intermediate transformer, resulting in higher conversion efficiency.

Grid Friendly Features

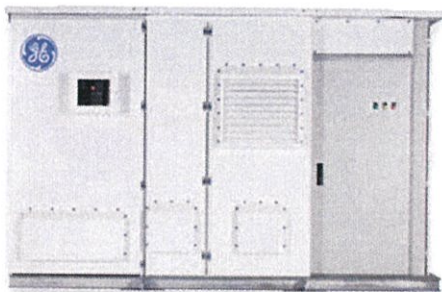
GE's solar inverter also comes enabled with several grid friendly features that have been developed with the expertise of GE's Controls Center of Excellence.

CONTROL System

GE's CONTROL system regulates voltage and power in real time. Like a conventional power plant, it supplies reactive power to the grid when it is needed, regulating system voltage and stabilizing weak grids. GE provides a simple integrated system of Volt-Amp-Reactive (VAR) control—unlike other systems that may require add-on capacitors or VAR compensators.

Reactive Power

GE's Reactive Power feature provides smooth fast voltage regulation by delivering controlled reactive power through all operating conditions. By supervising individual inverters, it ensures that the reactive power performance can meet—and often exceed—the performance of a conventional (non-solar) power



plant. This feature can eliminate the need for grid reinforcements specifically designed for no-sun conditions, and may allow for more economic commitment of other generating resources that can enhance grid security by reducing the risk of voltage collapse.

RIDE-THRU

Our innovative RIDE-THRU technology offers Low Voltage Ride Through (LVRT), Zero Voltage Ride Through (ZVRT) and High Voltage Ride Through (HVRT) capabilities. The ZVRT package is consistent with U.S. Federal Energy Regulatory Commission (FERC) requirements. This innovative feature enables inverters to meet transmission reliability standards more stringent than those demanded of thermal power generation plants.

Solar SCADA System

Solar SCADA provides a broad set of intuitive tools for operation and maintenance of the solar plant. GE's Solar SCADA application is accessible from anywhere on the network. It also can be used remotely with a secure Internet connection or a telephone line. To address the ever-growing security requirements in SCADA systems, user access control is integrated into the entire system and provides an audit trail for all activity. A large set of production and maintenance reports are available to enhance the owner's ability to drive productivity across all aspects of the solar plant operation.

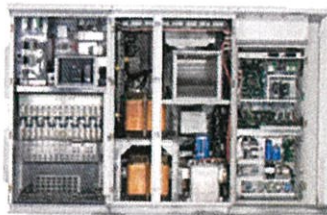


fact sheet

Technical Specifications

Output Power	Nominal AC Power	1,000 kWAC	1,000 kWAC
	Nominal AC Voltage	480 Vac (+10/-5%)	480 Vac (+10/-5%)
	Nominal AC Line Current	1,204 Aac	1,204 Aac
	Nominal Grid Frequency	50 Hz	60 Hz
	Nominal Power Factor	0.99 or greater	0.99 or greater
Efficiency	Peak Conversion Efficiency (without transformer)	> 98.0%	> 97.5%†
	Weighted Efficiency (without transformer)	> 97.5%† (EuroETA)	> 97.0%† (CEC)
	Night Time Consumption	< 250 W	< 250 W
Input Power	Input Voltage Max	1,000 Vdc	1,000 Vdc
	MPPT Voltage Range	450-850 Vdc	450-850 Vdc
	MPP DC Current	2,400 Adc	2,400 Adc
	Max Isc	3,600 Adc	3,600 Adc
Dimensions	Height	2,350 mm	2,350 mm
	Width	3,400 mm	3,400 mm
	Depth	1,300 mm	1,300 mm
	Weight	4,000 kg	4,000 kg
Environmental Design	Outdoor Enclosure	NEMA 3R (NEMA 3S Bridge and Controls)	NEMA 3R (NEMA 3S Bridge and Controls)
	Operating Temperature	-30.0 to 50.0 °C	-30.0 to 50.0 °C
Certifications and Standards		CE	UL508C CSA 22.2 #14 IEEE 519 UL 50E/CSA C22.2 #94.2 IBC/UBC Zone 4 (Seismic) IEC 60721-3-3 Class 3M3 (Sine Vibration) Ground Fault Indicator – per UL1741

Note: Efficiency measured using the CEC Weighted Average, and does not include losses of the Medium Voltage Transformer.
† 1000kw efficiency is preliminary. Certification is in process.



For more information about GE Energy's Brilliance Solar Inverters visit www.ge-energy.com/solar

* Brilliance is a trademark of the General Electric Company.
Copyright © 2010 General Electric Company. All rights reserved.

GEA18301107010

SUNPOWER

E19 / 240 SOLAR PANEL

MAXIMUM EFFICIENCY AND PERFORMANCE

BENEFITS

Highest Efficiency

SunPower™ Solar Panels are the most efficient photovoltaic panels on the market today.

More Power

Our panels produce more power in the same amount of space—up to 50% more than conventional designs and 100% more than thin film solar panels.

Reduced Installation Cost

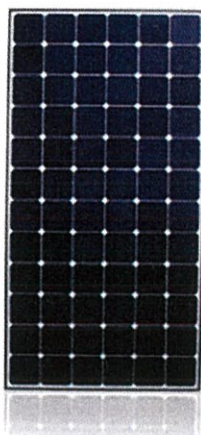
More power per panel means fewer panels per install. This saves both time and money.

Reliable and Robust Design

Proven materials, tempered front glass, and a sturdy anodized frame allow panel to operate reliably in multiple mounting configurations.

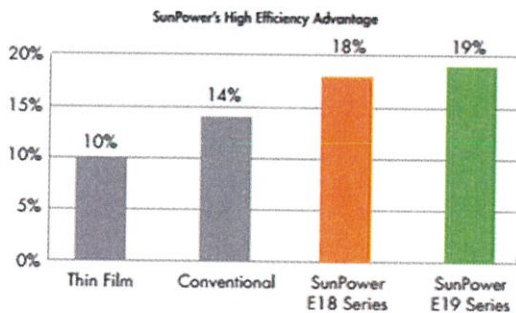


SPR-240E-WHT-D



E19
SERIES

The SunPower™ 240 Solar Panel provides today's highest efficiency and performance. Utilizing 72 all back-contact solar cells, the SunPower 240 delivers a total panel conversion efficiency of 19.3%. The panel's reduced voltage-temperature coefficient, anti-reflective glass and exceptional low-light performance attributes provide outstanding energy delivery per peak power watt.



SUNPOWER

E19 / 240 SOLAR PANEL

MAXIMUM EFFICIENCY AND PERFORMANCE

Electrical Data

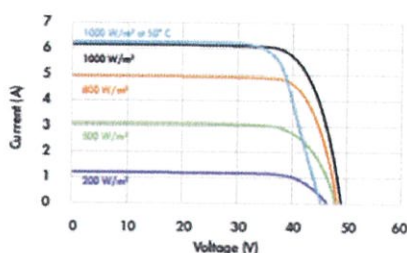
Measured at Standard Test Conditions (STC): irradiance of 1000W/m², Air Mass 1.5, and cell temperature 25° C

Peak Power (+5/-3%)	P _{max}	240 W
Efficiency	η	19.3 %
Rated Voltage	V _{mpp}	40.5 V
Rated Current	I _{mpp}	5.93 A
Open Circuit Voltage	V _{oc}	48.6 V
Short Circuit Current	I _{sc}	6.30 A
Maximum System Voltage	UL	600 V
Temperature Coefficients	Power (P)	-0.38% / K
	Voltage (V _{oc})	-132.5mV / K
	Current (I _{sc})	3.5mA / K
NOCT		45° C +/- 2° C
Series Fuse Rating		20 A

Mechanical Data

Solar Cells	72 SunPower all-back contact monocrystalline
Front Glass	High transmission tempered glass with anti-reflective (AR) coating
Junction Box	IP-65 rated with 3 bypass diodes Dimensions: 32 x 155 x 128 [mm]
Output Cables	1000mm length cables / MultiContact (MC4) connectors
Frame	Anodized aluminum alloy type 6063 (black)
Weight	33.1 lbs. (15.0 kg)

I-V Curve



Current/voltage characteristics with dependence on irradiance and module temperature.

Tested Operating Conditions

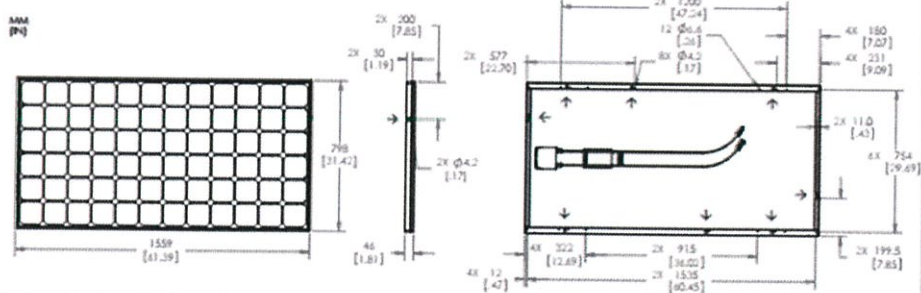
Temperature	-40° F to +185° F [-40° C to +85° C]
Max load	113 psf 550kg/m ² (5400 Pa) front - e.g. snow; 50 psf 245kg/m ² (2400 Pa) front and back - e.g. wind
Impact Resistance	Hail 1 in (25 mm) at 52mph (23 m/s)

Warranties and Certifications

Warranties	25 year limited power warranty 10 year limited product warranty
Certifications	Tested to UL 1703, Class C Fire Rating

Dimensions

→ Grounding Holes

MM
[IN]

CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.
Visit sunpowercorp.com for details.

SUNPOWER and the SUNPOWER logo are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation.
© November 2010 SunPower Corporation. All rights reserved. Specifications included in this document are subject to change without notice.

sunpowercorp.com
Document #001-05227 Rev.** / 02_10

ภาคผนวก ค

ข้อมูลรายละเอียดในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.ระบบไฟฟ้ากำลัง 9 บัส IEEE

ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตาราง ข.1 ข้อมูลแต่ละบัส 9 บัส IEEE

หมายเลข บัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชนิด ซีสเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟ ฟ้า (baseKV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน(MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Slack Bus	0	0	1	0	0	345	1.1	0.9
2	Generator	0	0	1	0	0	345	1.1	0.9
3	Generator	0	0	1	0	0	345	1.1	0.9
4	Load Bus	0	0	1	0	0	345	1.1	0.9
5	Load Bus	90	30	1	0	0	345	1.1	0.9
6	Load Bus	0	0	1	0	0	345	1.1	0.9
7	Load Bus	100	35	1	0	0	345	1.1	0.9
8	Load Bus	0	0	1	0	0	345	1.1	0.9
9	Load Bus	125	50	1	0	0	345	1.1	0.9

ตาราง ข.2 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 9 บัส IEEE

หมายเลข บัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดัน ติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
1	0	0	250	10	300	-300	1
2	163	0	300	10	300	-300	1
3	85	0	270	10	300	-300	1

ตาราง ข.3 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 9 บัส IEEE

ลำดับสาย ส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซัสเซปแตนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
1	1	4	0	0.0576	0	1
2	4	5	0.017	0.092	0.158	1
3	5	6	0.039	0.17	0.358	1
4	3	6	0	0.0586	0	1
5	6	7	0.0119	0.1008	0.209	1
6	7	8	0.0085	0.072	0.149	1
7	8	2	0	0.0625	0	1
8	8	9	0.032	0.161	0.306	1
9	9	4	0.01	0.085	0.176	1

2.ระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส IEEE

ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตาราง ข.4 ข้อมูลแต่ละบัส 14 บัสIEEE

หมายเลข บัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชนิด ซีสเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟ ฟ้า (baseKV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน(MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Slack Bus	0	0	1.06	0	0	0	1.06	0.94
2	Generator	21.7	12.7	1.045	-4.98	0	0	1.06	0.94
3	Generator	94.2	19	1.01	-12.72	0	0	1.06	0.94
4	Load Bus	47.8	-3.9	1.019	-10.33	0	0	1.06	0.94
5	Load Bus	7.6	1.6	1.02	-8.78	0	0	1.06	0.94
6	Generator	11.2	7.5	1.07	-14.22	0	0	1.06	0.94
7	Load Bus	0	0	1.062	-13.37	0	0	1.06	0.94
8	Generator	0	0	1.09	-13.36	0	0	1.06	0.94
9	Load Bus	29.5	16.6	1.056	-14.94	19	0	1.06	0.94
10	Load Bus	9	5.8	1.051	-15.1	0	0	1.06	0.94
11	Load Bus	3.5	1.8	1.057	-14.79	0	0	1.06	0.94
12	Load Bus	6.1	1.6	1.055	-15.07	0	0	1.06	0.94
13	Load Bus	13.5	5.8	1.05	-15.16	0	0	1.06	0.94
14	Load Bus	14.9	5	1.036	-16.04	0	0	1.06	0.94

ตาราง ข.5 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 14 บัสIEEE

หมายเลข บัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดัน ติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
1	232.4	-16.9	332.4	0	10	0	1.06
2	40	42.4	140	0	50	-40	1.045
3	0	23.4	100	0	40	0	1.01
6	0	12.2	100	0	24	-6	1.07
8	0	17.4	100	0	24	-6	1.09

ตาราง ข.6 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส IEEE

ลำดับ สายส่ง	บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ข้อผิดพลาด	การตั้งค่าแทน (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
4	2	4	0.05811	0.17632	0.034	1
5	2	5	0.05695	0.17388	0.0346	1
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0128	1
7	4	5	0.01335	0.04211	0	1
8	4	7	0	0.20912	0	1
9	4	9	0	0.55618	0	1
10	5	6	0	0.25202	0	1
11	6	11	0.09498	0.1989	0	1
12	6	12	0.12291	0.25581	0	1
13	6	13	0.06615	0.13027	0	1
14	7	8	0	0.17615	0	1
15	7	9	0	0.11001	0	1
16	9	10	0.03181	0.0845	0	1
17	9	14	0.12711	0.27038	0	1
18	10	11	0.08205	0.19207	0	1
19	12	13	0.22092	0.19988	0	1
20	13	14	0.17093	0.34802	0	1

3.ระบบไฟฟ้ากำลัง 39 บัส IEEE

ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตาราง ข.7 ข้อมูลแต่ละบัส 39 บัส IEEE

บัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชั้นต์ ซีสเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (baseKV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน(MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Load Bus	97.6	44.2	1.0393836	-13.536602	0	345	1.06	0.94
2	Load Bus	0	0	1.0484941	-9.7852666	0	345	1.06	0.94
3	Load Bus	322	2.4	1.0307077	-12.276384	0	345	1.06	0.94
4	Load Bus	500	184	1.00446	-12.276384	0	345	1.06	0.94
5	Load Bus	0	0	1.0060063	-11.192339	0	345	1.06	0.94
6	Load Bus	0	0	1.0082256	-10.40833	0	345	1.06	0.94
7	Load Bus	233.8	84	0.99839728	-12.755626	0	345	1.06	0.94
8	Load Bus	522	176.6	0.99787232	-13.335844	0	345	1.06	0.94
9	Load Bus	6.5	-66.6	1.038332	-14.178442	0	345	1.06	0.94
10	Load Bus	0	0	1.0178431	-8.170875	0	345	1.06	0.94
11	Load Bus	0	0	1.0133858	-8.9369663	0	345	1.06	0.94
12	Load Bus	8.53	88	1.000815	-8.9988236	0	345	1.06	0.94
13	Load Bus	0	0	1.014923	-8.9299272	0	345	1.06	0.94
14	Load Bus	0	0	1.012319	-10.715295	0	345	1.06	0.94

ตาราง ข.7 ข้อมูลแต่ละบัส 39 บัส IEEE(ต่อ)

บัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชั้นตํ ํซสเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (baseKV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน(MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
15	Load Bus	320	153	1.0161854	-11.345399	0	345	1.06	0.94
16	Load Bus	329	32.3	1.0325203	-10.033348	0	345	1.06	0.94
17	Load Bus	0	0	1.0342365	-11.116436	0	345	1.06	0.94
18	Load Bus	158	30	1.0315726	-11.986168	0	345	1.06	0.94
19	Load Bus	0	0	1.0501068	-5.4100729	0	345	1.06	0.94
20	Load Bus	608	103	0.99101054	-6.8211783	0	345	1.06	0.94
21	Load Bus	274	115	1.0323192	-7.6287461	0	345	1.06	0.94
22	Load Bus	0	0	1.0501427	-3.1831199	0	345	1.06	0.94
23	Load Bus	247.5	84.6	1.0451451	-3.3812763	0	345	1.06	0.94
24	Load Bus	308.6	-39.2	1.038001	-9.9137585	0	345	1.06	0.94
25	Load Bus	224	47.2	1.0576827	-8.3692354	0	345	1.06	0.94
26	Load Bus	139	17	1.0525613	-9.4387696	0	345	1.06	0.94
27	Load Bus	281	75.5	1.0383449	-11.362152	0	345	1.06	0.94
28	Load Bus	206	27.6	1.0503737	-5.9283592	0	345	1.06	0.94

ตาราง ข.7 ข้อมูลแต่ละบัส 39 บัส IEEE(ต่อ)

บัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชั้นต ซัสเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (baseKV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน(MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
29	Load Bus	283.5	26.9	1.0501149	-3.1698741	0	345	1.06	0.94
30	Generator	0	0	1.0499	-7.3704746	0	345	1.06	0.94
31	Slack Bus	9.2	4.6	0.982	0	0	345	1.06	0.94
32	Generator	0	0	0.9841	-0.1884374	0	345	1.06	0.94
33	Generator	0	0	0.9972	-0.19317445	0	345	1.06	0.94
34	Generator	0	0	1.0123	-1.631119	0	345	1.06	0.94
35	Generator	0	0	1.0494	1.7765069	0	345	1.06	0.94
36	Generator	0	0	1.0636	4.4684374	0	345	1.06	0.94
37	Generator	0	0	1.0275	-1.5828988	0	345	1.06	0.94
38	Generator	0	0	1.0265	3.8928177	0	345	1.06	0.94
39	Generator	1104	250	1.03	-14.535256	0	345	1.06	0.94

ตาราง ข.8 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 39 บัส IEEE

หมายเลข บัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดัน ติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
30	250	161.762	1040	0	400	140	1.0499
31	677.871	221.574	646	0	300	-100	0.982
32	650	206.965	725	0	300	150	0.9841
33	632	108.293	652	0	250	0	0.9972
34	508	166.688	508	0	167	0	1.0123
35	650	210.661	687	0	300	-100	1.0494
36	560	100.165	580	0	240	0	1.0636
37	540	-1.36945	564	0	250	0	1.0275
38	830	21.7327	865	0	300	-150	1.0265
39	1000	78.4674	1100	0	300	-100	1,03

ตาราง ข.9 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 39 บัสIEEE

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแทนซ์	การตั้งค่าแทป(p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
1	1	2	0.0035	0.0411	0.6987	1
2	1	39	0.001	0.025	0.75	1
3	2	3	0.0013	0.0151	0.2572	1
4	2	25	0.007	0.0086	0.146	1
5	2	30	0	0.0181	0	1.025
6	3	4	0.0013	0.0213	0.2214	1
7	3	18	0.0011	0.0133	0.2138	1
8	4	5	0.0008	0.0128	0.1342	1
9	4	14	0.0008	0.0129	0.1382	1
10	5	6	0.0002	0.0026	0.0434	1
11	5	8	0.0008	0.0112	0.1476	1
12	6	7	0.0006	0.0092	0.113	1
13	6	11	0.0007	0.0082	0.1389	1
14	6	31	0	0.025	0	1.07
15	7	8	0.0004	0.0046	0.078	1
16	8	9	0.0023	0.0363	0.3804	1
17	9	39	0.001	0.025	1.2	1
18	10	11	0.0004	0.0043	0.0729	1
19	10	13	0.0004	0.0043	0.0729	1
20	10	32	0	0.02	0	1.07
21	12	11	0.0016	0.0435	0	1.006
22	12	13	0.0016	0.0435	0	1.006
23	13	14	0.0009	0.0101	0.1723	1
24	14	15	0.0018	0.0217	0.366	1
25	15	16	0.0009	0.0094	0.171	1
26	16	17	0.0007	0.0089	0.1342	1

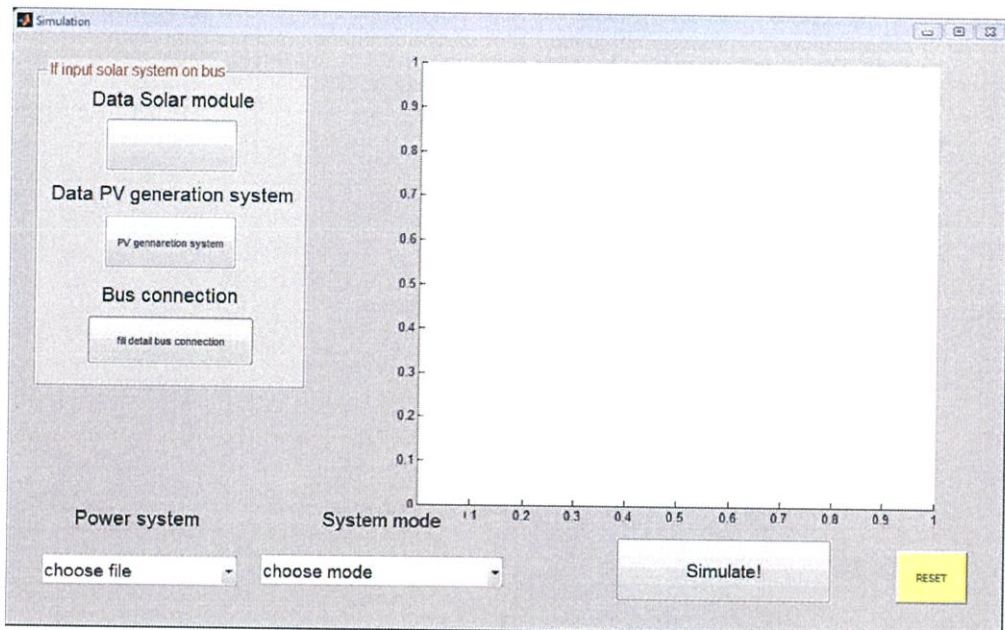
ตาราง ข.9 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 39 บัสIEEE(ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป(p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
27	16	19	0.0016	0.0195	0.304	1
28	16	21	0.0008	0.0135	0.2548	1
29	16	24	0.0003	0.0059	0.068	1
30	17	18	0.0007	0.0082	0.1319	1
31	17	27	0.0013	0.0173	0.3216	1
32	19	20	0.0007	0.0138	0	1.06
33	19	33	0.0007	0.0142	0	1.07
34	20	34	0.0009	0.018	0	1.009
35	21	22	0.0008	0.014	0.2565	1
36	22	23	0.0006	0.0096	0.1846	1
37	22	35	0	0.0143	0	1.025
38	23	24	0.0022	0.035	0.361	1
39	23	36	0.0005	0.0272	0	1
40	25	26	0.0032	0.0323	0.531	1
41	25	37	0.0006	0.0232	0	1.025
42	26	27	0.0014	0.0147	0.2396	1
43	26	28	0.0043	0.0474	0.7802	1
44	26	29	0.0057	0.0625	1.029	1
45	28	29	0.0014	0.0151	0.249	1
46	29	38	0.0008	0.0156	0	1.025

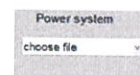
ภาคผนวก ง

คำอธิบายการใช้งานหน้าจอแถม

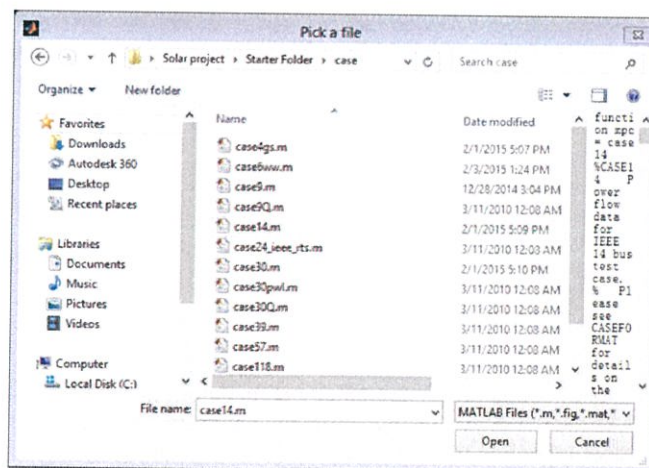
1. เมื่อเปิดโปรแกรมจะมีรูปภาพต่างโปรแกรมดังนี้



2. เลือก เคสไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังให้กดปุ่ม choose file

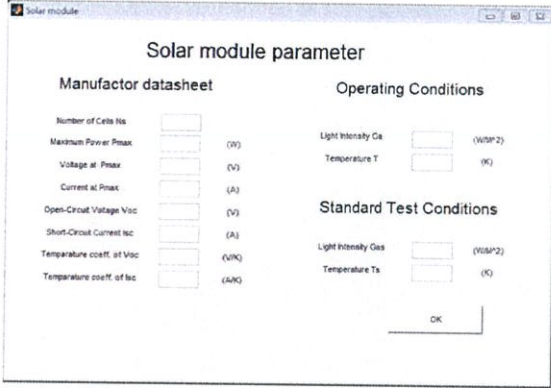


ซึ่งเมื่อกดจะมีหน้าต่างขึ้นดังรูป



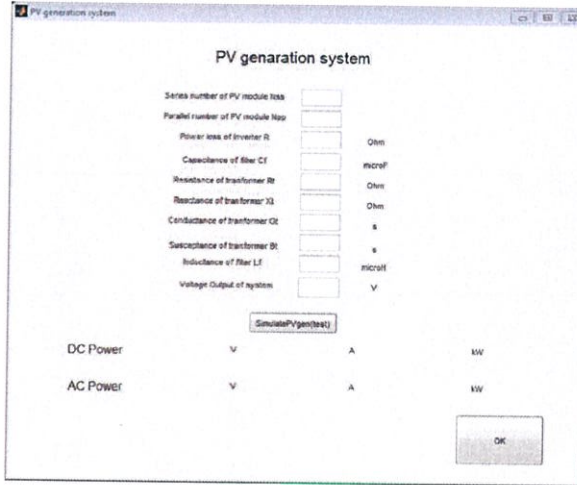
เมื่อเลือกเคสไฟล์ที่ต้องการแล้วให้กดปุ่ม Open

3. กดปุ่ม  เพื่อเข้าไปใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบเซลล์แสงอาทิตย์
เมื่อกดจะมีหน้าต่าง



เมื่อใส่ค่าในพารามิเตอร์ต่างๆเสร็จกดปุ่ม OK หน้าจะหายไปและค่าจะถูกบันทึกลงในโปรแกรม

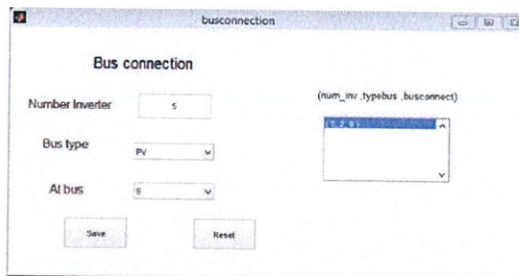
4. กดปุ่ม  จะมีหน้าต่างเพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ PV generation system



เมื่อกดปุ่ม simulatePVgen(test) จะแสดงค่าในส่วนของ DC power และส่วนของ AC power

เมื่อใส่ค่าพารามิเตอร์เสร็จกดปุ่ม Ok หน้าจะหายไปและค่าจะถูกบันทึกลงในโปรแกรม

4. กดปุ่ม  เพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในบัสที่ต้องการใส่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใส่จำนวนอินเวอร์เตอร์เข้าไปในบัสโดยปุ่มเมื่อกดปุ่ม Save ค่าจะแสดงในหน้าต่างทางด้านขวา

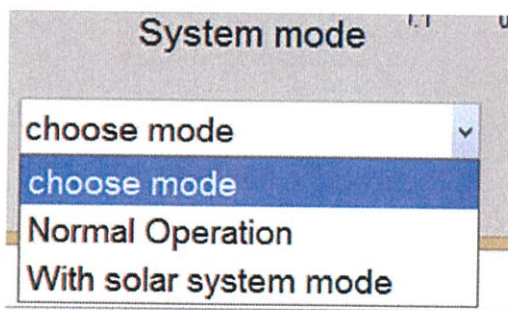


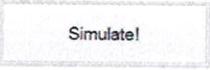
ทำการใส่ค่าจำนวนอินเวอร์เตอร์ เลือกชนิดบัส PV หรือ PQ เลือกบัสที่ต้องการใส่จำนวนอินเวอร์เตอร์ของเมื่อใส่ค่าเสร็จกดปุ่มออก

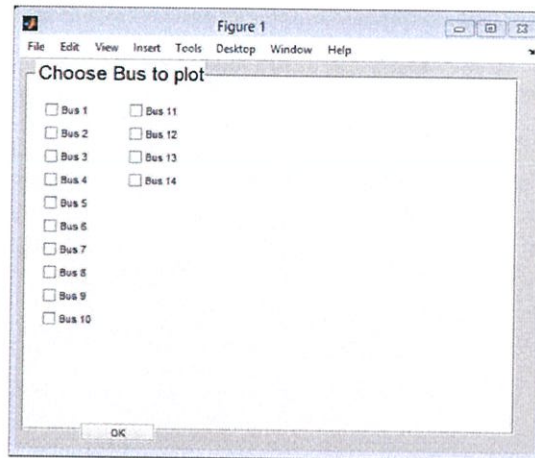
ถ้ากดปุ่ม reset ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะถูกล้างข้อมูลทั้งหมด

5. เลือกโหมดในการคำนวณมี

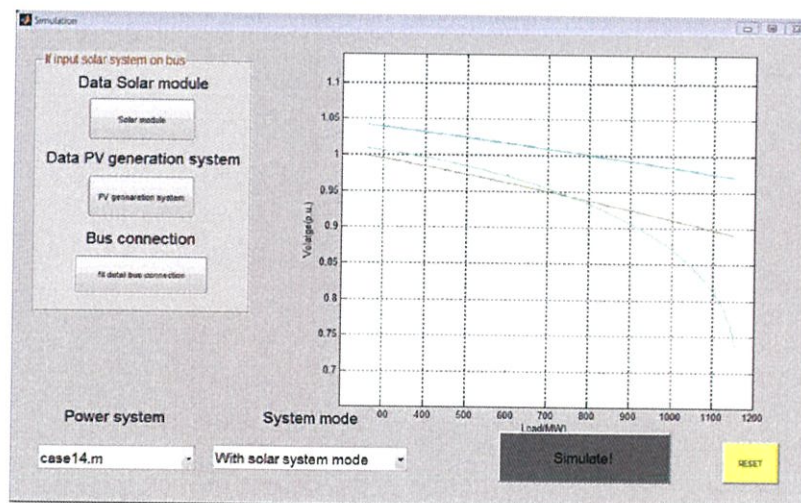
- 1. Normal Operation คือการหากราฟแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของระบบปกติจากเคสไฟล์
- 2. With solar system mode การหากราฟแรงดันไฟฟ้าและโหลดรวมทั้งระบบมีการเติมระบบพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง



6. กดปุ่ม  เพื่อหากราฟแรงดันไฟฟ้าและโหลดรวมทั้งระบบของแต่ละบัสระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จจะมีหน้าต่างดังรูปขึ้น



เลือกบัสที่ต้องการจะแสดงกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้าและโหลดรวมทั้งระบบกราฟที่ต้องการขึ้นมาดังภาพ



7. เมื่อต้องการล้างข้อมูลทุกอย่างของโปรแกรมทั้งหมดกดปุ่มรีเซต 

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ นายธนพนธ์ จิระพิบูลย์พันธ์
 วันเกิด 7 มีนาคม พ.ศ.2536
 ที่อยู่ 19 ถ.พัฒนาการคูขวาง ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช 80000
 เบอร์โทร 0878869990
 อีเมล gust.t_t@hotmail.com



ชื่อ นางสาว ธนาภา เกตุรัตน์กุล
 วันเกิด 11 ธันวาคม พ.ศ. 2535
 ที่อยู่ 150/28-29 ถ.หลานหลวง เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย
 แขวงคลองมหานาค จ.กรุงเทพฯ 10100
 เบอร์โทร 087-5567066
 อีเมล thanapa.gate@gmail.com



ชื่อ นายรัชชัย เรืองรอง
 วันเกิด 24 สิงหาคม พ.ศ.2535
 ที่อยู่ 18 หมู่11 ต.ศิระชะจรเข้้น้อย อ.บางเสาธง จ.สมุทรปราการ 10540
 เบอร์โทร 0870783379
 อีเมล thawatchai_ru@outlook.com



ชื่อ นายรัชชัย วสุธารัตน์
 วันเกิด 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2535
 ที่อยู่ 147 หมู่ 3 ต.ห้วยยูง อ.เหนือคลอง จ.กระบี่ 81130
 เบอร์โทร 0822705473
 อีเมล gegadestroyer@hotmail.com