

การพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Improving Voltage Stability of Grid-Connected PV Power System Using GA

โดย

นายประวีร์	นิธโยธาน
นายพิชญ์	อรรถวัน
นายภูริเดช	วสุนธราธรรม
นายศุภกฤต	ประสิทธิ์พร

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
Improving Voltage Stability of Grid-Connected PV Power System Using GA

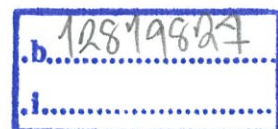


T144356

โดย

นายประวีร์	นิธโยธาน
นายพิชญ์	อรรถวัน
นายภูริเดช	วสุนธราธรรม
นายศุภกฤต	ประสิทธิ์พร

เลขที่.....
เลขทะเบียน 144356
วันเดือนปี 24 พ.ย. 2559



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

Improving Voltage Stability of Grid-Connected PV Power System Using GA

Prawee	Nitayotan
Pitch	Athawan
Phuridej	Wasoontharatharm
Supakit	Prasitporn

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

2015

ปีการศึกษา 2558

การพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม
Improving Voltage Stability of Power System with Genetic Algorithm

โดย

นายประวีร์	นิธโยธาน
นายพิชญ์	อรรณวัน
นายภูริเดช	วสุนธราธรรม
นายศุภกฤต	ประสิทธิ์พร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วรุตม์ สุอำพัน

ปริญญาโทปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน

แสงอาทิตย์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ผู้จัดทำ

1. นายประวีร์ นิธโยธาน
2. นายพิชญ์ อรรณวิน
3. นายภูริเดช วสุนธราธรรม
4. นายศุภกฤต ประสิทธิ์พร



(ดร.วรุตม์ สุอำพัน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

การพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

นาย ประวีร์ นิธิโยธาน
นาย พิชญ์ อรรถวัน
นาย ภูริเดช วสุนธราธรรม
นาย ศุภกฤต ประสิทธิ์พร
ดร. วรุตม์ สุอาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์และการพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยอาศัยข้อมูลการผลิตไฟฟ้า การส่งกำลังไฟฟ้า และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยในการระบุตำแหน่งบัสและปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งและดำเนินงานแผงพลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งทำการศึกษาผลกระทบเชิงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการติดตั้งด้วยโปรแกรมขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ตัวบ่งชี้แอลซึ่งเป็นค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ และใช้วิธีการของนิวตันแบบสองชั้นเพื่อหาคำตอบการไหลเวียนกำลังไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดลองจากระบบทดสอบ IEEE และ ระบบจำลองสายส่งแรงสูงของประเทศไทยพบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ และให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างแม่นยำ

Improving Voltage Stability of Grid-connected Photovoltaic Power Systems using Genetic Algorithm

Mr.Prawee Nitayotan

Mr.Pitch Atthawan

Mr.Phuridej Wasoontharatham

Mr.Supakit Prasitporn

Dr.Warut Suampun Supervisor

ABSTRACT

This project presents a numerical study and an enhancement scheme for improving voltage stability of grid-connected photovoltaic power systems by using genetic algorithm (GA). Based on the generation, transmission and distribution data of Thailand power grid, we can determine an optimal location for solar panel installation, compute optimal generation levels for the PV systems, and also analyze the impact on power system voltage stability. The genetic algorithm program developed in this project uses the L-indicator, which is an index for determining power system voltage stability level, as an objective function. Then Newton power flow and Newton photovoltaic method are used to find power flow answer of grid-connected photovoltaic power systems. The results show that the program we developed can improve voltage stability of IEEE test systems and Thailand's high voltage transmission system model and can reliably give optimal solutions.

Keyword: Voltage stability, Grid-connected photovoltaic power systems, Genetic Algorithm (GA), L-indicator, Objective function.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องการพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร. วรุตม์ สุอำพัน อาจารย์ที่ปรึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และได้กรุณาตรวจแก้ไข จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้คณะผู้จัดทำรู้สึกปลาบปลื้มและซาบซึ้งถึงพระคุณ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้คอยอบรมสั่งสอน คอยดูแลเอาใจใส่และอบรมวิชาความรู้ ความเข้าใจในเนื้อหาของวิชาต่างๆที่ได้ศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันทำให้สามารถนำความรู้ต่างๆที่ได้จากคณาจารย์ทุกท่านมาประยุกต์พัฒนา และนำมาประกอบจัดทำเป็นปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตคือ บิดา มารดาและครอบครัวที่ได้ดูแลเอาใจใส่ สนับสนุนด้านการศึกษาอย่างเต็มที่ตลอด คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น	5
2.1.1 เพอร์ยูนิต (Per Unit)	6
2.1.2 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์	6
2.1.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน	8
2.1.4 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow Analysis)	9
2.1.5 การวิเคราะห์การไหลเวียนกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่อกับ แผงพลังงานแสงอาทิตย์	12
2.2 เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า	16
2.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า	16
2.2.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าเสมือนต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า	17
2.2.3 L - indicator: ตัวบ่งชี้ แอล	18
2.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA)	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1 รูปแบบของปัญหา	21
2.3.2 กระบวนการสร้างประชากร	22
2.3.3 กระบวนการให้คะแนนประชากร (Fitness Function)	23
2.3.4 กระบวนการคัดเลือก (Selection)	25
2.3.5 กระบวนการครอสโอเวอร์ (Crossover)	25
2.3.6 การกลายพันธุ์ (Mutation)	27
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	28
3.1 แผนผังขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม	29
3.1.1 แผนผังการคำนวณหาค่า L-indicator	29
3.1.2 แผนผังโฟลว์ชาร์ตของการคำนวณและแสดงผล PV Curve	30
3.1.3 แผนผังโฟลว์ชาร์ตของหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	32
3.1.4 แผนผังการทำงานของวิธีการขั้นตอนเชิงพันธุกรรม	33
3.2 ออกแบบการทดลอง	35
3.2.1 การทดลองที่ 1	35
3.2.2 การทดลองที่ 2	36
3.2.3 การทดลองที่ 3	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง	38
4.1 ผลการทดลองที่ 1	38
4.2 ผลการทดลองที่ 2	41
4.3 ผลการทดลองที่ 3	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ	63

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข DATASHEET	67
ภาคผนวก ค ข้อมูลรายละเอียดในระบบไฟฟ้ากำลัง	72
ประวัติผู้เขียน	123

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลัง	5
2.2 วงจรสมมูลของสายส่งแบบพาย	7
2.3 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า	7
2.4 การเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบ	12
2.5 รูปแบบการต่อของแผงพลังงานแสงอาทิตย์	14
2.6 วงจรสมมูลของด้านไฟฟ้ากระแสสลับ	15
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (Load increment หรือ Load margin) กับแรงดันไฟฟ้าที่บัส (Nodal voltage)	17
2.8 กราฟความสัมพันธ์ของ PV curve กับ L - indicator	18
วัตถุประสงค์ของการใช้ตัวบ่งชี้แอล	18
2.9 การแสดงการครอสโอเวอร์แบบสองจุด	26
2.10 การแสดงการครอสโอเวอร์แบบผสม	26
3.1 แสดง Flowchart ของการพัฒนาโปรแกรมเพื่อเก็บค่า L – Indicator	29
3.2 Flowchart ของการพัฒนาโปรแกรมแสดงผลกราฟ PV Curve	31
3.3 Flowchart ของหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	32
3.4 แสดง Flowchart ของการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	33
3.5 แสดง Flowchart ของการทดลองที่ 2 และ 3	34
4.1 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 9 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 9)	38
4.2 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 8)	39
4.3 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 31)	39
4.4 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 2)	40
4.5 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซนต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus	41
4.6 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซนต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus	42
4.7 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซนต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus	42
4.8 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซนต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus	43
4.9 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซนต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus	53
4.27 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus	54
4.28 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus	54
4.29 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus	55
4.30 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus	55
4.31 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus	56
4.32 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus	56
4.33 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus	57
4.34 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เพอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในระบบกับค่าตัวบ่งชี้แอลของตัวอย่างกรณีศึกษา	19
4.1 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus	48
4.2 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์เข้าระบบที่หลายบัส ของ IEEE 30 bus, IEEE 57 bus และ Thailand case 124	58
ค.1 ข้อมูลแต่ละบัส	73
ค.2 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 9 bus	74
ค.3 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 9 bus	75
ค.4 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 30 bus	76
ค.5 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 30 bus	80
ค.6 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 bus	81
ค.7 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 57 bus	83
ค.8 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 57 bus	89
ค.9 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 bus	90
ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 bus	92
ค.11 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 bus	104
ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 bus	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาด้านพลังงานนั้นนับเป็นปัญหาใหญ่สำหรับประเทศไทยเนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยใช้ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินทั้งจากที่ผลิตเองภายในประเทศและจากการนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้านถึง 84 เปอร์เซ็นต์ในการผลิตไฟฟ้า [1] แหล่งพลังงานฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัดเหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างต่อเนื่องและมีปริมาณที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศเป็นอย่างมาก ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องค้นหา "แหล่งพลังงานทดแทน" ที่มีความประหยัด มีอยู่อย่างไม่จำกัดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย พลังงานทดแทนที่เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยคือ พลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูงเป็นอันดับที่สองรองจากพลังงานชีวมวลและมีต้นทุนการรับซื้อที่ราคาสูง (Levelized cost) ประกอบกับประเทศไทยมีแผนพัฒนากำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า พ.ศ.2558–2579 (PDP 2015) (ฉบับร่าง) ที่เน้นการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น และมีโครงการที่จะเชื่อมโยงโครงข่ายระบบสายส่งไฟฟ้าภายในภูมิภาคอาเซียน ซึ่งหากประเทศไทยจะเพิ่มการใช้พลังงานทดแทนประเภทพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าย่อมต้องมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของประเทศอย่างแน่นอน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเชื่อมต่อบริเวณผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นระบบแบบอะซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าของประเทศซึ่งโดยส่วนใหญ่เน้นเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ซึ่งการเชื่อมต่อนี้อาจมีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เราจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาร่วมกันโดยจำลองการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากำลังต่อกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าจากแหล่งอื่นด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นและปรับปรุงระบบไฟฟ้าในด้านเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าให้มั่นคง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ที่มีตัวบ่งชี้แอล (L-indicator) ที่เป็นดัชนีชี้วัดค่าเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า
2. เพื่อนำโปรแกรมมาเป็นเครื่องมือในการศึกษาหาผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับระบบ

พลังงานทดแทน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

1. วิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า (Voltage stability) โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างภาระกำลังไฟฟ้าต่อระดับแรงดันไฟฟ้า และ ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกำลังไฟฟ้าต่อตัวบ่งชี้แอล (L indicator) จากการใช้โปรแกรม MATLAB
2. คำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการทางระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)
3. วิเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมกับระบบพลังงานทดแทนประเภทพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ปฏิญานพนธ์เล่มนี้ ประกอบด้วยขั้นตอนวิธีการศึกษาที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. กำหนดขอบเขตของโครงการงาน และศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เสถียรภาพทางแรงดันในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง การล่มสลายทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง ศึกษาการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) ในระบบโดยใช้วิธีการนิวตันราฟสัน (Newton Raphson) ในการหาคำตอบของระบบสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า
2. ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB การใช้คำสั่งต่างๆเพื่อใช้ในวิธีการหาเสถียรภาพทางแรงดันของระบบ
3. นำมาประยุกต์รวมเข้ากับการเขียนโปรแกรมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ค่าดัชนีบ่งบอกการพังทลายของแรงดันในแต่ละบัส (L indicator) ของทั้งระบบไฟฟ้ากำลังได้
2. สามารถวิเคราะห์หาการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ด้วยกระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
3. สามารถวิเคราะห์หาการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของระบบต่ำที่สุดได้

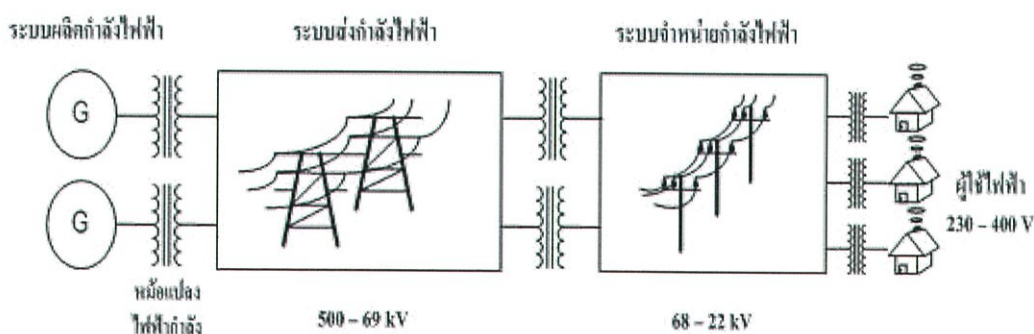
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องในการวิจัยเรื่องการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้การวิเคราะห์ทางพันธุกรรม มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ การหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) โดยใช้วิธีการนิวตันราฟสัน การหาจุดตั้งหลายของแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง การคำนวณค่าตัวบ่งชี้แอล (L - Indicator) การคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

2.1 หลักการการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น

ระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึง ระบบที่ทำหน้าที่ผลิต เคลื่อนย้าย และส่งจ่ายไฟฟ้าสู่ผู้ใช้โดยผ่านโครงข่ายของสายส่ง รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบไปด้วย 3 ระบบย่อยคือ 1) ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจะทำการเปลี่ยนรูปพลังงานจากแหล่งพลังงานอื่น เช่น น้ำ แสงอาทิตย์ หรือความร้อน มาให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า 2) ระบบส่งกำลังไฟฟ้า คือ โครงข่ายสายส่งแรงดันสูงทำหน้าที่เคลื่อนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้ และ 3) ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าทำหน้าที่แจกจ่ายไฟฟ้าสู่ชุมชน ระบบไฟฟ้ากำลังที่ดีต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ความมีเสถียรภาพของระบบ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเหมาะสมตามหลักเศรษฐศาสตร์ [2]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1.1 เปอรียูนิต (Per Unit)

เปอรียูนิตคือปริมาณที่เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณจริง (Actual Quantity) และ ปริมาณฐาน (Reference Base Quantity)

$$\text{Per Unit} = \frac{\text{Actual}}{\text{Base}} \quad (2.1)$$

ปริมาณเปอรียูนิต (per unit) เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยซึ่งใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับระบบ ไฟฟ้ากำลัง ปริมาณที่ต้องหาค่าเปอรียูนิตได้แก่ อิมพีแดนซ์ (Impedance Z) แรงดัน กระแส (Current I) กำลังไฟฟ้า (Power S)

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

การหาค่าฐานระบบ 1 เฟส (Single Phase System)

การคำนวณหาค่าฐาน ต้องกำหนดค่าฐานอ้างอิงขึ้นมา 2 ค่า เช่น ฐานของกำลังไฟฟ้า และแรงดัน

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base}1\phi}}{V_{\text{base}LN}} \quad (2.2)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} = \frac{(V_{\text{base}})^2}{S_{\text{base}}} \quad (2.3)$$

การหาค่าฐานระบบ 3 เฟส (Three Phase System)

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base}1\phi}}{\sqrt{3} \times V_{\text{base}LN}} \quad (2.4)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{\sqrt{3} \times I_{\text{base}}} = \frac{(V_{\text{base}}/3)^2}{(S_{\text{base}}/3)} \quad (2.5)$$

$$S_{\text{p.u.}1\phi} = S_{\text{p.u.}3\phi} \quad (2.6)$$

2.1.2 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์

ในทางวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง แอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ หรือวายบัส คือเมทริกซ์จัตุรัส ขนาด $n \times n$ ที่แสดงค่าความสัมพันธ์แอดมิตแตนซ์ของโหนดต่างๆในระบบ เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังจริง อาจมีบัสจำนวนมาก การคำนวณแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการคำนวณการไหลของ กำลังไฟฟ้า โดยมีสมการและขั้นตอนการคิดดังนี้

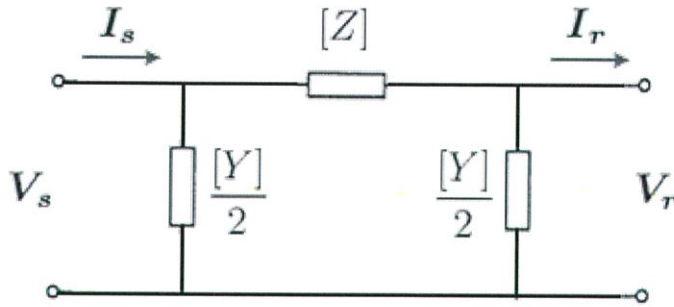
$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} \quad (2.7)$$

$$Y = \frac{1}{Z} = Z^{-1} \quad (2.8)$$

$$I = Y_{\text{bus}} V_s \quad (2.9)$$

รูปทั่วไปของ Y_{bus} คือ $Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} \end{bmatrix}$ โดยที่ $y_{ji} = y_{ij}$ คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส j

วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย (Equivalent pi circuit: Π)



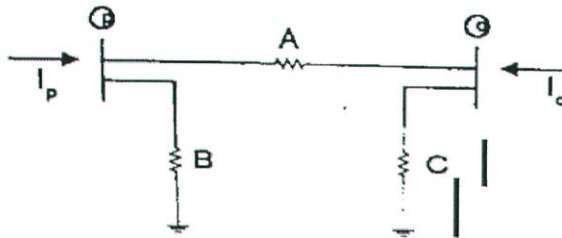
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของสายส่งแบบพาย

โดย $Z_{sr} = R_{sr} + jX_{sr}$, Z_{sr} = ความต้านทานรวมของสายส่ง sr , R_{sr} = ความต้านทานของสายส่ง sr , X_{sr} = อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่ง sr , Y = โลนซ์ชาร์จิจึงแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง sr และกำหนดให้ $\frac{Y}{2} = B$ เมื่อสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์แล้วสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

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

วงจรสมมูลที่มีการต่อหม้อแปลง



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองด้านหม้อแปลงสามารถเขียนในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\frac{y_{ij}}{|a|^2} \right) & \frac{-y_{ij}}{a^*} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & \sum_{j=1, j \neq i}^n (y_{ij}) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

โดยให้ i แทนบัสที่กำลังไฟฟ้าไหลออก, j แทนบัสที่กำลังไฟฟ้าไหลเข้า, a คือ อัตราส่วนรอบของหม้อแปลง ถ้าระหว่างบัสใดที่ไม่มีหม้อแปลง $a = 1$, y_{ij} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่าง i และบัส j ดังนั้นเมื่อเขียนแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์จะคิดรวมกันตามวงจรสมมูลจะได้

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\frac{y_{ij} + B_{ij}}{|a|^2} \right) & \frac{-y_{ij}}{a^*} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & \sum_{j=1, j \neq i}^n (y_{ij} + B_{ij}) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.1.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

วิธีการนิวตัน ราฟสัน เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้าซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบ การล่มสลายแรงดันไฟฟ้าของระบบ การวางแผนและการจ่ายโหลดอย่างคุ้มค่าในระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้น คือการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดต่างๆในระบบโดยสามารถศึกษาได้จากความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Amplitude) มุมของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Angle) ที่บัสต่างๆ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลผ่านอุปกรณ์เช่นหม้อแปลงและสายส่งต่างๆรวมถึงกำลังที่สูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย

การคำนวณหาค่าตอบระบบสมการด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

หลักการสำคัญของวิธีนิวตัน ราฟสัน คือการลอินเนียร์ไรซ์สมการนอน-ลอินเนียร์ และทำการคำนวณซ้ำเพื่อหาผลเฉลยของสมการ โดยเริ่มจากการเดาค่าเริ่มต้นของตัวแปรไม่ทราบค่าทั้งหมด (ขนาดและมุมของแรงดันที่โหลดบัสและมุมของแรงดันที่บัสแหล่งจ่าย) จากนั้นใช้ออนุกรมเทเลอร์ (Taylor's Series) โดยไม่สนใจอันดับสูงๆ เพื่อลอินเนียร์ไรซ์ แต่ละสมการสมดุลของแต่ละบัส ในแต่ละรอบการคำนวณวิธีการนิวตัน ราฟสัน ใช้การประมาณแบบเชิงเส้นเพื่อหาค่าตอบตัวต่อไปขั้นตอนการคำนวณนิวตัน ราฟสัน 1 ตัวแปรเป็นดังนี้

1. ให้ค่าคาดเดาเริ่มต้น $x^{(0)}$
2. ลอินเนียร์ไรซ์ฟังก์ชัน ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์

$$f(x) = f(x^{(0)}) + \frac{df(x^{(0)})}{dx} (x - x^{(0)}) \quad (2.13)$$

3. หาค่า Δx ที่ทำให้การลอินเนียร์ไรซ์ฟังก์ชันเท่ากับศูนย์

$$f(x) = 0 \approx f(x^{(0)}) + \frac{df(x^{(0)})}{dx} (\Delta x^{(0)}) \quad (2.14)$$

4. ใช้การประมาณค่าของสมการเส้นตรง (linear approximation) เพื่อคำนวณหา Δx

$$\Delta x^{(0)} = - \left[\frac{df(x^{(0)})}{dx} \right]^{-1} f(x^{(0)}) \quad (2.15)$$

5. คำนวณหาค่า $x^{(1)}$ ซึ่งเป็นคำตอบใหม่ และใช้ในการคำนวณรอบต่อไป

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} \quad (2.16)$$

6. คำนวณซ้ำไปเรื่อยๆจนกว่าจะเจอคำตอบ โดยเมื่อคำตอบเข้าใกล้ผลเฉลยแท้จริงค่าความคลาดเคลื่อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ฟังก์ชันจาโคเบียน

ฟังก์ชันจาโคเบียนคือ รูปแบบการคำนวณของวิธีการนิวตัน ราวเส้น ที่มีหลายตัวแปร โดยการใช้การหาอนุพันธ์ย่อย เขียนในรูปเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$f(\hat{x}) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix}}_{\text{Jacobian matrix, } J(x)} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.1.4 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow Analysis)

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยปกติมีค่าที่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้าคือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้โดยโหลด S_D ค่ากำลังไฟฟ้าที่สร้างโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า S_G ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า V_G แต่ค่าลักษณะของระบบที่ไม่ทราบล่วงหน้าคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส (Complex bus voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าที่ส่งเข้าระบบ (Complex injected current) ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถใช้สมการ $I = Y_{bus}V$ ในการหาคำตอบของสมการได้โดยตรง โดยมีสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า [2] คือ

$$S_i = P_i + jQ_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k|(\cos \theta_{ik} + j \sin \theta_{ik})(G_{ik} - jB_{ik}) \quad (2.18)$$

เมื่อแยกกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex power) ให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) จะได้

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) = P_{Gi} - P_{Di} = 0 \quad (2.19)$$

สมการสมดุลของกำลังไฟฟ้าจริง (P)

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) = Q_{Gi} - Q_{Di} = 0 \quad (2.20)$$

สมการสมดุลของกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q)

โดยที่ P_i , Q_i คือกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ถูกรายจ่ายที่บัส i G_{ik} คือส่วนจริงของบัสแอดมิตแตนซ์, B_{ik} คือส่วนจินตภาพของบัสแอดมิตแตนซ์ที่ตำแหน่งแถวที่ i และตำแหน่งหลักที่ k และ $\theta_{ik} = \delta_i - \delta_k$ คือผลต่างมุมแรงดันระหว่างบัส i และ k กำลังไฟฟ้าจริงถูกส่งผ่านจากบัสที่มีมุมแรงดันมากไปสู่บัสที่มีมุมแรงดันน้อยและกำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกส่งจากบัสที่มีขนาดแรงดันมากกว่าไปสู่บัสที่มีขนาดแรงดันน้อยกว่า ยกเว้นกรณีที่มุมแรงดันมีขนาดใหญ่มากๆ

ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจะทำการจำแนกบัสในระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. บัสอ้างอิง (Slack bus) จะกำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า โดยบัสอ้างอิงมีไว้เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยให้กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบและชดเชยความแตกต่างของกำลังการผลิตและภาระทางไฟฟ้าของระบบ

2. บัสควบคุมแรงดัน (PV bus) จะกำหนดให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสคงที่ส่วนมุมของแรงดันและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

3. บัสของภาระทางไฟฟ้า (PQ bus) จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนบัสคงที่ส่วนขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

ดังนั้นจะกำหนดให้ 2 ปริมาณคงที่และอีก 2 ปริมาณเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าซึ่งต้องอาศัยการวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาตัวแปรไม่ทราบค่าดังกล่าวเพื่อการคำนวณการไหลของระบบไฟฟ้าต้องใช้สมการสมดุลของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q)

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้ากำลัง

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้าในที่นี้ใช้อ้างอิงในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการคำนวณการไหลของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ให้ระบบไฟฟ้ากำลังสมดุล 3 เฟสในสภาวะปกติ (Steady state condition) เป็นระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้ากำลัง

2. ในการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์และสมการการไหลของระบบไฟฟ้ากำลังจะยึดบััสเป็นกรอบอ้างอิง (Bus of reference)
3. ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังจะมีบััสอ้างอิงเพียง 1 บััส
4. ภาระทางไฟฟ้าทั้งหมดทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลังคงที่
5. ใช้วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย (Equivalent pi circuit: π)

ตัวแปรสถานะ

ตัวแปรสถานะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าซึ่งประกอบไปด้วยมุมของแรงดันที่บััสของแหล่งจ่ายหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและขนาดและมุมของแรงดันที่ภาระทางไฟฟ้า ตามลำดับ ดังนี้

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

การแก้ปัญหาการไหลของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีนิวตัน ราบสัน

วิธีการหาคำตอบระบบมีหลากหลายวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ Newton-Raphson solution method โดยใช้สมการผลต่างกำลังและหลักการของฟังก์ชันจาโคเบียน

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.22)$$

สำหรับวิธีการหาคำตอบของการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้ากำลังแบบนิวตันราบสันคือ

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันไม่ทราบค่า
2. แก่สมการสมดุลกำลังไฟฟ้าแต่ละบััสโดยใช้ขนาดและมุมของแรงดันปัจจุบันหรือค่าเริ่มต้น

เริ่มต้น

3. แทนค่าเริ่มต้นในสมการจาโคเบียนและแก้สมการจาโคเบียน
4. แปลงระบบเป็นเชิงเส้นและแก้สมการเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมของแรงดันตามสมการ 2.22
5. ปรับปรุงค่าของขนาดและมุมของแรงดัน
6. ตรวจสอบเงื่อนไขถ้าตรงตามเงื่อนไขให้จบการทำงานถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขให้เริ่มซ้ำที่ขั้นตอนที่ 2

ทำซ้ำที่ขั้นตอนที่ 2

นอกจาก Newton-Raphson solution method ปัจจุบันมีการนำวิธีอื่นๆที่สามารถเข้ามาแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าเช่น Fast-decoupled load flow method ที่พัฒนาจากวิธีนิวตันราบสันเนื่องจากสายส่งส่วนใหญ่เป็นความต้านทานเสมือนทำให้ค่าในเมตริกซ์จาโคเบียนที่ไม่ใช่ตำแหน่งเส้นทแยงมุมมีค่าน้อยมากรูปแบบของการดีคัปปลิงจะใช้รูปแบบขั้นตอนวิธีนิวตันราบสันอย่างง่ายในการแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าเขียนได้ดังนี้

$$A(x^v) = \begin{bmatrix} j^v 11 & 0 \\ 0 & j^v 22 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

ค่าในเมตริกซ์ตำแหน่งเส้นทแยงมุมเราสามารถแบ่งสมการออกเป็นสองส่วนคือ

$$j_{11}^v \Delta \theta^v = \Delta P(x^v) = -[V]B[V] \quad (2.24)$$

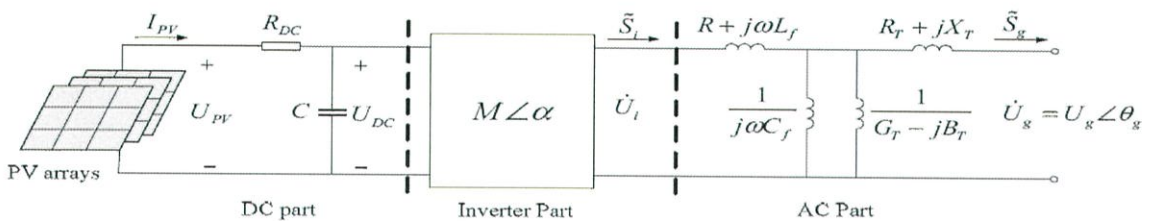
และ

$$j_{22}^v \Delta |V|^v = \Delta Q(x^v) - [V]B \quad (2.25)$$

สรุปคือวิธี Fast-decoupled load flow สามารถให้คำตอบของระบบไฟฟ้าที่รวดเร็วกว่าวิธีนิวตันราฟสันแต่ค่าความละเอียดน้อยกว่าวิธีนิวตันราฟสัน ถ้าต้องการได้ค่าที่ละเอียดแม่นยำมากที่สุดโดยการคำนวณไม่ซับซ้อนจึงเลือกวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson solution method) มาใช้

2.1.5 การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่อกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV system) จะเริ่มวิเคราะห์จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.4 [3]



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบ

ส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง จะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ

U_{pv} คือ แรงดันตกคร่อมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (PV arrays)

I_{pv} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์

P_{pv} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ส่วนของอินเวอร์เตอร์ มีลักษณะเป็น 3 – Phase half bridge inverter และ Sinusoidal pulse width modulate (SPWM) จะมีตัวแปรสำคัญ คือ

M_a คือ อัตราส่วนขยายขนาดแรงดันไฟฟ้า

α คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่มีการเลื่อนผ่านอินเวอร์เตอร์

U_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งหลังอินเวอร์เตอร์

P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ตำแหน่งหลังอินเวอร์เตอร์

ส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับ จะมี LC filter และ Step up transformers และจะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ

P_g คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ตำแหน่งที่เชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลัง

Q_g คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ตำแหน่งที่เชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลัง

U_g คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่เชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลัง

θ_g คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่เชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองดังรูปที่ 2.4 เป็นแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอุปกรณ์เชื่อมต่อ คือ

1. ส่วนของ Three phase half – bridge inverter และ Sinusoidal pulse width modulation (SPWM) ซึ่งตัวแปรในส่วนนี้จะมีค่า μ และ α
2. ส่วนของ LC filter จะมีค่าตัวแปรเป็น L_f , C_f
3. ส่วนของ Step – up transformer (Star – Delta) จะมีลักษณะวงจรจำลองเป็น T-equivalent circuit ซึ่งมีตัวแปรเป็น R_T , X_T , G_T และ B_T

การคำนวณค่าของวงจรดังรูปที่ 2.4 จะเริ่มจากการวิเคราะห์ในส่วนของแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ (PV arrays) ที่เป็นส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง (DC part) ตามด้วยส่วนอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter part) และตามด้วยส่วนของไฟฟ้ากลับสลับเพื่อหาค่าของ P_g , Q_g , U_g และ θ_g ที่ตำแหน่งที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง (Point of common coupling : PCC) ค่าตัวแปรดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ต่อในส่วนของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

การคำนวณในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง (DC part)

(I – V ในส่วนนี้จะมีอุปกรณ์ในการคำนวณ คือ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งจาก สมการคุณลักษณะของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ equivalent photovoltaic cell) แสดงดังนี้

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{R_{sh}} \quad (2.26)$$

จากสมการ 2.26 จะมีตัวแปรสำคัญ 5 ตัวแปรที่ขึ้นกับลักษณะการต่อวงจรและภูมิอากาศ คือ

I_L (Light current) คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแสงอาทิตย์

I_0 (Diode reverse saturation current) คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับ

R_s (series resistance) คือ ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม

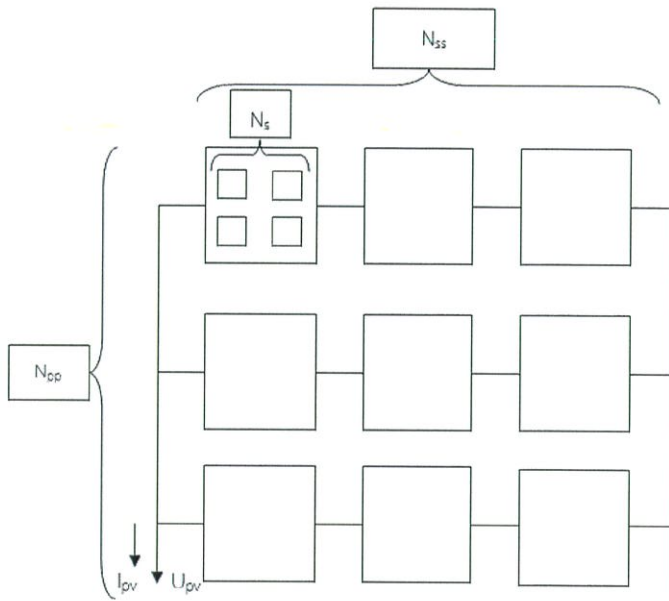
R_{sh} (Shunt resistance) คือ ค่าความต้านทานที่ต่อขนาน

a (Modified ideality factor) คือ ค่าคงที่ที่แปรผันตามสภาพภูมิอากาศและอุณหภูมิ

การวิเคราะห์แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point : MPP) จากสมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์จะหาแรงดันไฟฟ้าที่ MPP (V_{mpp}) และจากกระแสไฟฟ้าที่ MPP (I_{mpp}) ได้ดังนี้

$$\frac{d(VI)}{dV} = 0 = I_{mpp} + V_{mpp} \left(\frac{-I_0 R_{sh} \exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{a}\right) - a}{a R_{sh} + I_0 R_s R_{sh} \exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{a}\right) + a R_s} \right) \quad (2.27)$$

รูปแบบการต่อของแผงพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.5 รูปแบบการต่อของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

จะได้

$$U_{pv} = N_s N_{ss} V_{cell} \quad (2.28)$$

$$I_{pv} = N_{pp} I_{cell} \quad (2.29)$$

$$P_{pv} = U_{pv} I_{pv} \quad (2.30)$$

โดย

N_s คือ จำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมใน 1 แผง

N_{ss} คือ จำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมใน 1 แถว

N_{pp} คือ จำนวนแถวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนานกัน

การคำนวณส่วนของอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter part)

อุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ชนิด Three phases half-bridge inverter และ SPWM จะ
ได้สมการแรงดันไฟฟ้าด้านกระแสสลับ คือ

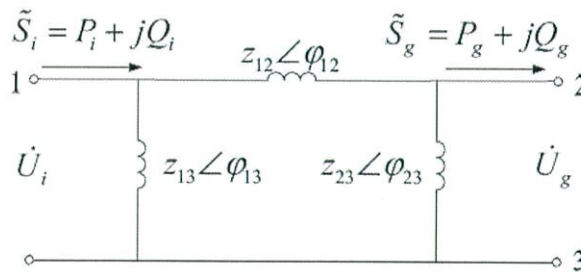
$$U_i \angle \alpha = \frac{\sqrt{2}}{4} M U_{pc} \angle \alpha \quad (2.31)$$

จากหลักการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง จะได้

$$P_i = P_{pv} \quad (2.32)$$

การคำนวณส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC part)

จากรูปที่ 2.4 วงจรในส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับสามารถนำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.6
ได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของด้านไฟฟ้ากระแสสลับ

จะได้ค่าของกำลังไฟฟ้า ดังสมการต่อไปนี้

$$P_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos \varphi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \cos \varphi_{13} - \frac{U_g}{z_{12}} \cos(\theta_g - \alpha - \varphi_{12}) \right] \quad (2.33)$$

$$Q_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin \varphi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \sin \varphi_{13} + \frac{U_g}{z_{12}} \sin(\theta_g - \alpha - \varphi_{12}) \right] \quad (2.34)$$

$$P_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos(\theta_g - \alpha - \varphi_{12}) - \frac{U_g}{z_{12}} \cos \varphi_{12} - \frac{U_g}{z_{23}} \cos \varphi_{23} \right] \quad (2.35)$$

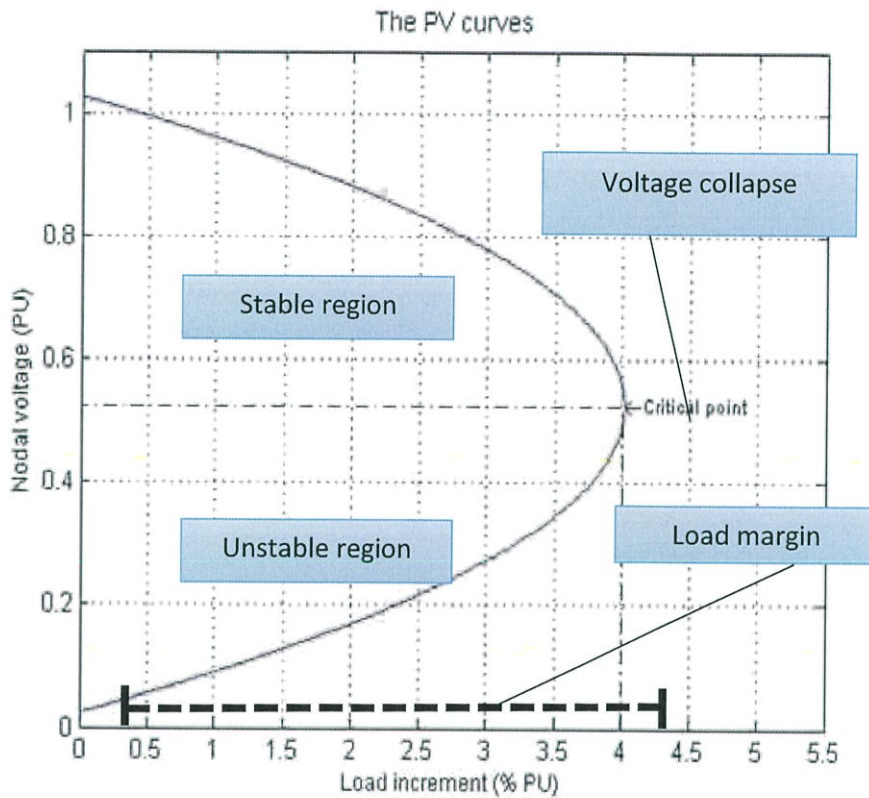
$$Q_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin(\theta_g - \alpha - \varphi_{12}) + \frac{U_g}{z_{12}} \sin \varphi_{12} + \frac{U_g}{z_{23}} \sin \varphi_{23} \right] \quad (2.36)$$

2.2 เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถของระบบในการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าของทุกระดับให้อยู่ในสภาวะการทำงานที่ปกติภายหลังจากการรบกวนที่เกิดขึ้นต่อระบบ ซึ่งรวมทั้งการรบกวนขนาดเล็ก (small disturbance) และการรบกวนขนาดใหญ่ (Large disturbance) เมื่อเสถียรภาพทางแรงดันลดลงอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าของบัสสูงขึ้นหรือตกลงได้และอาจนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดันในที่สุด ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้คือ การตัดภาระทางไฟฟ้า (Load shedding) และการสูญเสียสภาพเชิงโครโนซิมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ

2.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

PV curve คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางไฟฟ้าในหน่วยกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าของบัส ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและใช้พื้นฐานการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า การพล็อตกราฟ PV curve สามารถทำได้โดยการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าจนกว่าระดับแรงดันจะถึงจุด Nose point หรือ ที่เรียกว่า จุดวิกฤต ที่จุดนี้เป็นจุดที่ระบบสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันที่จุดนี้เรียกว่า แรงดันวิกฤต



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(Load increment หรือ Load margin) กับ แรงดันไฟฟ้าที่บัส (Nodal voltage) [4]

PV curve ใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจขอบเขตเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า ขอบเขตเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าในเชิงภาระทางไฟฟ้า (load margin) พิจารณาได้จากกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนถึงการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.7 ลักษณะกราฟเป็นรูปแบบพาราโบลาโบลิก ส่วนบนของกราฟแสดงถึงพื้นที่เสถียรภาพทางไฟฟ้าที่ระบบสามารถรองรับภาระทางไฟฟ้าได้ (Stable region) และที่จุดวิกฤต (Critical point) หรือจุดพังทลายของแรงดัน (Voltage collapse) คือขอบเขตของเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบ ในกราฟส่วนล่างจะเป็นส่วนที่ไม่มีเสถียรภาพทางระบบไฟฟ้า (Unstable region)

จุดพังทลายของแรงดัน (Voltage collapse) คือ จุดวิกฤตก่อนที่ระบบไฟฟ้าจะสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดันจนไม่สามารถดำเนินการได้ ณ จุดที่เกิดการพังทลายของแรงดันสามารถแสดงถึงขอบเขตเสถียรภาพของระบบในเชิงภาระทางไฟฟ้า (Load margin) หรือขอบเขตภาระทางไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าสามารถรองรับได้ ณ ขณะนั้น

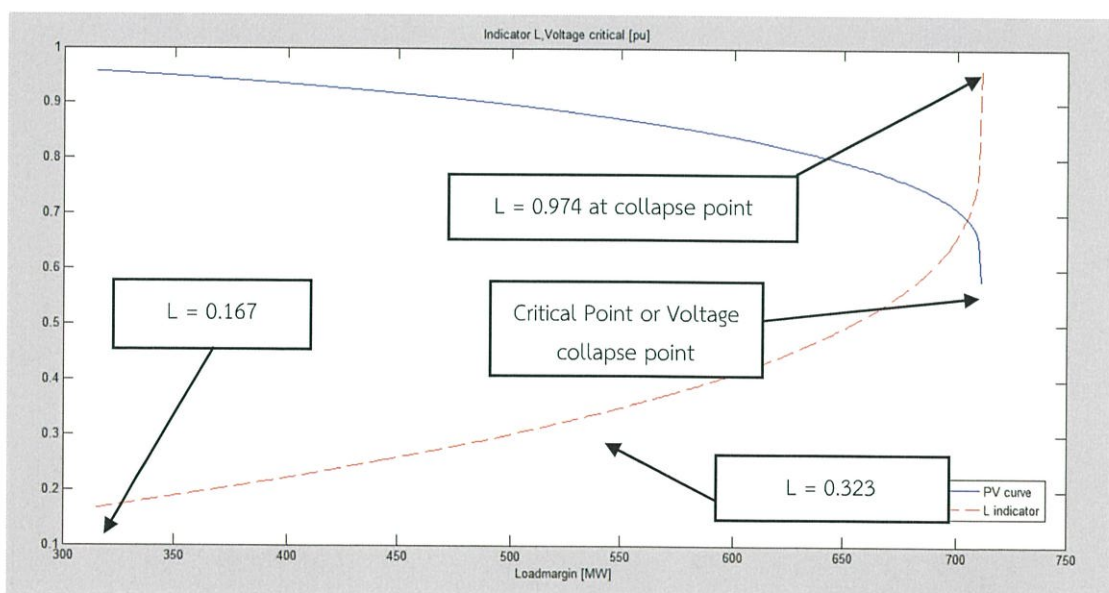
2.2.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าเสมือนต่อเสถียรภาพระดับแรงดันไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ปรากฏในระบบไฟฟ้ามีสองประเภทคือ แบบเหนี่ยวนำ (inductive) และแบบเก็บประจุ (capacitive) กำลังไฟฟ้าเสมือนทั้งสองประเภทรูปร่างสามารถถูกใช้และผลิตได้จากภาระ

ทางไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นองค์ประกอบสำคัญในการดำเนินการและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงนั้นถูกใช้ในการสร้างงานหรือพลังงาน ในการดำเนินการของระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าเสมือนมีผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นอย่างมาก หากกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบต่ำเกินไปจนตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้จะส่งผลกระทบต่อ ภาวะไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น หม้อแปลงจะไม่สามารถควบคุมระดับแรงดันได้จนนำไปสู่การพังทลายของแรงดันหรือสภาวะแบล็คเอาท์ และถ้าปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไม่เพียงพอที่จะทดแทนการสูญเสียที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งก็จะมีผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะมีผลกระทบต่อการทำงานของกำลังไฟฟ้าจริงด้วย แต่ถ้าหากกำลังไฟฟ้าเสมือนมีมากเกินไปกระแสที่ไหลในสายส่งก็จะสูงมากและส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังในสายส่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2.2.3 L indicator: ตัวบ่งชี้ แอล

เป็นวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพของแรงดันในระบบไฟฟ้าอย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Continuation method) [5] ตัวบ่งชี้แอลคือปริมาณการวัดสำหรับการประมาณระยะห่างระหว่างเสถียรภาพของระบบที่มีอยู่ในปัจจุบันกับขอบเขตเสถียรภาพซึ่งมีค่าระหว่างศูนย์ (ระบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า) กับหนึ่ง (เกิดการพังทลายของแรงดัน) หรือ $(0 \leq \text{ตัวบ่งชี้แอล} \leq 1)$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ของ PV curve กับ L indicator

วัตถุประสงค์ของการใช้ตัวบ่งชี้แอล

1. ตรวจสอบจุดอ่อนของระบบไฟฟ้า
2. ประเมินสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง
3. ระบุตำแหน่งวิกฤตในระบบที่มีอุปกรณ์ป้องกันติดตั้งอยู่ได้

4. ทำนายจุดพังทลายของแรงดันภายใต้สภาวะต่างๆได้
5. ขยายแนวคิดของการประเมินความปลอดภัยในศูนย์ควบคุม

จากวัตถุประสงค์ของการใช้ตัวบ่งชี้แอล แสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบเสถียรภาพระดับแรงไฟฟ้าสามารถทำนายได้โดยใช้ตัวบ่งชี้แอล เนื่องจากมีความรวดเร็วในการคำนวณและไม่จำเป็นต้องคำนวณซ้ำ รวมไปถึงสามารถบอกจุดอ่อนในระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขหรือปัญหาทางไฟฟ้าต่างๆได้เช่น การขาดหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่งและภาระทางไฟฟ้า

ผลสรุปของการใช้ตัวบ่งชี้แอลในการทำนายเสถียรภาพทางไฟฟ้า

ตัวบ่งชี้แอลมีขั้นตอนและวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีบัสจำนวนมาก (Multi-node system) และระบบไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นของภาระทางไฟฟ้า (Local load increment) และค่าตัวบ่งชี้แอลที่ได้มีความแม่นยำที่มีความคลาดเคลื่อน (ϵ) ที่ยอมรับได้ ดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในระบบกับค่าตัวบ่งชี้แอลของตัวอย่างกรณีศึกษา

กรณีศึกษา (Case)	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำสุดใน ระบบ(Critical voltage) [pu] $\epsilon = 0.01$	ตัวบ่งชี้แอล (L indicator) $\epsilon = 0.01$
Case1	0.827	0.429
Case2	0.823	0.461
Case3	0.801	0.503
Case4	0.731	0.622
Case5	0.709	0.675
Case6	0.668	0.886
Case7	0.665	1.034
Case8	0.602	1.017
Case9	0.595	1.239
Case10	0.529	1.253

จากตารางที่ 2.1 พบว่าเมื่อแรงดันที่ต่ำที่สุดในระบบไฟฟ้ามีค่าต่ำลงค่าตัวบ่งชี้แอลจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มภาระทางไฟฟ้า (Load increment) จะทำให้แรงดันไฟฟ้าต่ำลงดังนั้นหากมีการเพิ่มภาระไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดพังทลายของระดับแรงดันแล้วค่าตัวบ่งชี้แอลจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง การคำนวณหาตัวบ่งชี้แอลในระบบไฟฟ้า

ในการพิจารณาระบบที่มีบัสจำนวน N และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน N_G สามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่าง

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

เมื่อ I_G, I_L และ V_G, V_L แทน กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ บัสของภาระทางไฟฟ้าจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

และ

$$F_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}] \quad (2.39)$$

$$L = \left| \mathbf{1} - \sum_{i=1}^{N_G} F_{ij} \frac{V_i}{V_j} \angle \theta_{ij} + \delta_i - \delta_j \right| \quad (2.40)$$

เมื่อ i, j คือตำแหน่งบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ภาระไฟฟ้าตามลำดับ

V_i, V_j คือขนาดแรงดันที่ บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ภาระไฟฟ้าตามลำดับ

θ_{ij} คือ มุมเฟสในรูปของเมทริกซ์ F_{ij}

δ_i, δ_j คือมุมระหว่างเฟสของแรงดันบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ภาระไฟฟ้าตามลำดับ

ในการพิจารณาค่า ตัวบ่งชี้แอล (L indicator local) จะพิจารณาจากบัส N มีค่าตัวบ่งชี้แอลสูงสุดเป็นค่าพิจารณาเนื่องจากเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดที่จะเกิดภาวะพังทลายของแรงดันได้

$$L = \text{MAX}_{j \in L} [L_j] \quad (2.41)$$

2.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA)

เป็นกระบวนการที่ใช้หาคำตอบที่เหมาะสมโดยใช้หลักพื้นฐานของการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต กระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การออกแบบต่างๆ , หุ่นยนต์, การเดินทาง หรือ การวางแผนเส้นทาง, เกมคอมพิวเตอร์, การถอดรหัส, วางแผนการเงิน การลงทุน ฯลฯ โดยปริญาณิพนธ์เล่มนี้ ได้นำกระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งในด้าน ค่าใช้จ่าย และ เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า [6]

แม้กระบวนการนี้ จะสามารถนำมาใช้ได้อย่างหลากหลายและมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน เช่นในกรณีที่ปัญหามีขนาดค่อนข้างใหญ่ หรือมีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง จะทำให้การคำนวณทำได้ยากเนื่องจากภาระการคำนวณที่สูงขึ้น อีกทั้งอาจเกิดปัญหาในการหาคำตอบได้ ในบางกรณี ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้ เช่น ปัญหาถูก/ผิด เป็นต้น เพราะไม่สามารถคำนวณค่าคะแนนได้ และไม่สามารถพัฒนาได้

ซึ่งในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) มีกระบวนการสำคัญคือ กระบวนการสร้างประชากร (Create Population), กระบวนการให้คะแนนประชากร (Fitness Function), กระบวนการคัดเลือกประชากร (Selection), กระบวนการครอสโอเวอร์ (Crossover), กระบวนการกลายพันธุ์ของประชากร (Mutation)

2.3.1 รูปแบบของปัญหา

รูปแบบของปัญหาของการลดค่าใช้จ่าย

จุดประสงค์ : หาค่าที่ต่ำที่สุดของ $\sum_{i=1}^n C_i(P_{g,i})$

$$\text{ข้อจำกัด : } S_g - S_L - S(V, \theta) = 0 \quad (2.42)$$

$$P_{g,i}^{min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{max} \quad (2.43)$$

$$S(V, \theta) - S_{max} \leq 0 \quad (2.44)$$

$C_i(P_{g,i})$: เป็นฟังก์ชันของราคาที่ใช้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i (\$/hr)

S_g : เป็นค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MVA)

S_L : เป็นค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมของโหลด (MVA)

$S(V, \theta)$: เป็นค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบสายส่ง (MVA)

$P_{g,i}$: เป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

รูปแบบของปัญหาของเสถียรภาพแรงดัน

จุดประสงค์ : หาค่าที่ต่ำที่สุดของ L_i^{\max}

$$\text{ข้อจำกัด : } S_g - S_L - S(V, \theta) = 0 \quad (2.45)$$

$$S(V, \theta) - S_{\max} \leq 0 \quad (2.46)$$

$$0.9 \leq V_{pv,i} \leq 1.1 \quad (2.47)$$

$$Q_{tap} = 5 \text{ Mvar} \quad (2.48)$$

$$0 \leq Q_{D,i} \leq 5 \quad (2.50)$$

L_i^{\max} : เป็นค่าตัวบ่งชี้แอลที่บัส i ซึ่งมีสภาพอ่อนแอที่สุด

$V_{pv,i}$: เป็นค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i (p.u.)

Q_{tap} : เป็นค่าตัวเก็บประจุต่อ tap ที่ต่อเข้ากับระบบ

$P_{g,i}^{\min}, P_{g,i}^{\max}$: เป็นค่าของเขตกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i (MW)

$Q_{D,i}$: เป็นจำนวน tap ที่ทำการติดตั้งที่บัสโหลด i (เป็นจำนวนเต็ม)

2.3.2 กระบวนการสร้างประชากร

ขั้นตอนแรกของวิธีการเชิงพันธุกรรมคือการสร้างประชากรชุดแรกเพื่อเริ่มการคำนวณประชากรชุดแรกนี้ จะถูกสร้างจากการสุ่มค่าโดยค่าที่สุ่มออกมาต้องอยู่ในขอบเขตของตัวแปรนั้นๆ ในกรณีของการสร้างประชากรในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

การสร้างประชากรค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($P_{g,pop}$) จะเป็นการสุ่มค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_g) ในช่วงขอบเขตการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบัสควบคุมแรงดันนั้นๆ (PV-bus)

$$P_{g,\min} \leq P_{g,pop} \leq P_{g,\max} \quad (2.51)$$

ส่วนค่าของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_g) ณ ตำแหน่งบัสอ้างอิง (Slack-bus) จะถูกสร้างโดยผ่านกระบวนการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังแบบ นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson)

การสร้างประชากรค่าแรงดันไฟฟ้าต่อหน่วย ($V_{pu,pop}$) ในช่วง 0.9 ถึง 1.1 ณ ตำแหน่งบัสควบคุมแรงดัน (PV-bus)

$$0.9 \leq V_{pu,mpop} \leq 1.1 \quad (2.52)$$

ส่วนของค่าแรงดันต่อหน่วย ($V_{p.u.}$) ณ ตำแหน่งบัสอ้างอิง (Slack-bus) จะคงค่าแรงดันต่อหน่วย ($V_{p.u.,slack}$) เดิมไว้

การสร้างประชากรค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุช่วยระบบ ($Q_{d,pop}$) ค่าของกำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกกำหนดแทนด้วยค่าแทนตัวเก็บประจุในช่วง 1-5 ต่อหน่วย โดยค่าต่อหน่วยขึ้นอยู่กับค่าฐานกำลังไฟฟ้า(base MVA) โดยตัวเก็บประจุจะถูกติดตั้ง ณ ตำแหน่งบัสของภาระทางไฟฟ้า (PQ-bus)

$$1 p.u. \leq Q_d \leq 5 p.u. \quad (2.53)$$

ตัวอย่างของตัวแปร P_g : 330, 600, 473 V_g : 0.9870, 0.9625, 1.0356 Q_d : 1, 2, 3, 4, 5

2.3.3 กระบวนการให้คะแนนประชากร (Fitness Function)

เป็นกระบวนการที่บ่งบอกคะแนนของประชากรโดยผ่านฟังก์ชันให้คะแนน (Fitness Function) ที่มีความแตกต่างกันไปตามค่าที่ต้องการหาคำตอบ ลักษณะของฟังก์ชันให้คะแนน (Fitness Function) จะเป็นสมการที่ประกอบด้วย ตัวแปรที่ต้องการหา (Main Factor) และตัวแปรลงโทษ (Penalty Factor) โดยค่าคะแนนที่สูงกว่านั้น บ่งชี้ถึงลักษณะของคำตอบที่ดีกว่า หากคำตอบที่ต้องการทราบเป็นการหาค่าที่มากที่สุด

$$Fitness = Main - (Penalty_1 + Penalty_2 + \dots + Penalty_n) \quad (2.54)$$

หากคำตอบที่ต้องการทราบเป็นการหาค่าที่น้อยที่สุด

$$Fitness = \frac{1}{Main - (Penalty_1 + Penalty_2 + \dots + Penalty_n)} \quad (2.55)$$

2.1 ตัวแปรหลัก (Main Factor) เป็นค่าตัวแปร ที่ต้องการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

2.2 ตัวแปรลงโทษ (Penalty Factor) เป็นตัวแปรที่สร้างขึ้นเพื่อลงโทษประชากรที่มีการผิดกฎการคำนวณหรือมีค่าไม่อยู่ในขอบเขตของข้อจำกัด ซึ่งผลของตัวแปรนี้จะทำให้ค่า Fitness มีค่าที่แยกลง ค่าตัวแปรลงโทษอาจเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$Penalty Factor = K(S) \quad (2.56)$$

โดย K เป็นค่าคงที่บ่งบอกน้ำหนักของการลงโทษ

$S = 0$ บ่งบอกว่าตัวแปรของประชากรยังอยู่ในขอบเขตหรือข้อกำหนด

$S = 1$ บ่งบอกว่าตัวแปรของประชากรไม่อยู่ในขอบเขตหรือข้อกำหนด

ในกรณีกระบวนการให้คะแนนประชากรของระบบไฟฟ้ากำลังของปริภูมิพหุเหลี่ยมนี้ แบ่งจุดประสงค์ของการหาคำตอบ 2 แบบ

แบบที่ 1 เป็นการหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบไฟฟ้ากำลัง (Economic Dispatch of Power System) โดยค่าตัวแปรหลักจะเป็นค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Operating Cost : $C(P_g)$) เขียนได้ดังสมการ

$$\sum_{i=1}^n C_1(P_g) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (2.57)$$

ค่าตัวแปรลงโทษจะใช้ค่าบ่งบอกว่า การไหลของกำลัง (Newton power flow) ถูกต้องหรือไม่ เขียนได้ดังสมการ

$$PN = K_S(1 - S) \quad (2.58)$$

โดย PN เป็น ตัวแปรลงโทษของการไหลของกำลัง $S = 1$ เป็นตัวบ่งชี้ว่า การไหลของกำลังถูกต้อง K_S เป็น ค่าคงที่บ่งบอกน้ำหนักการลงโทษ $S = 0$ เป็นตัวบ่งชี้ว่าการไหลของกำลังไม่ถูกต้อง

ในการหาการกระจายโหลดอย่างประหยัดของระบบไฟฟ้ากำลัง (Economic Dispatch of Power System) เป็นการหาค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด เพราะฉะนั้น ฟังก์ชันให้คะแนน (Fitness Function) จะได้ดังสมการ

$$Fitness = \frac{1}{\sum_{i=1}^n C_1(P_g) + K_S(1-S)} \quad (2.59)$$

แบบที่ 2 เป็นการหาเสถียรภาพของกำลังไฟฟ้า (Voltage Stability) โดยค่าตัวแปรหลักจะเป็นค่า L_{index} สูงสุด ซึ่งหาได้จากสมการ 2.40

$$L = \left| 1 - \sum_{i=1}^{N_G} F_{ij} \frac{V_i}{V_j} \angle \theta_{ij} + \delta_i - \delta_j \right| \quad (2.40)$$

ค่าตัวแปรลงโทษจะเป็นค่าบ่งบอกว่า การไหลของกำลังถูกต้องหรือไม่ เช่นเดียวกับแบบที่ 1 ในการหา เสถียรภาพแรงดัน ที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่า L_{index}^{max} ที่ต่ำที่สุด เพราะฉะนั้น ฟังก์ชันให้คะแนน (Fitness Function) จะได้ดังสมการ

$$Fitness = \frac{1}{L_{index}^{max} + K_S(1-S)} \quad (2.60)$$

$$\text{โดย } L = \left| \mathbf{1} - \sum_{i=1}^{N_G} F_{ij} \frac{V_i}{V_j} \angle \theta_{ij} + \delta_i - \delta_j \right| \quad (2.40)$$

2.3.4 กระบวนการคัดเลือก (Selection)

เป็นกระบวนการคัดเลือกประชากรโดยการเปรียบเทียบคะแนนจากกระบวนการให้คะแนนประชากร (Fitness Function) ในหัวข้อที่ 2. กล่าวคือเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดประชากรที่มีคะแนนแยกจากรุ่นของประชากร (Generation) ซึ่งรูปแบบทั่วไปของการคัดเลือกจะมี 3 รูปแบบ คือ

- การคัดเลือกแบบกงล้อสุ่ม (Roulette Selection)
- การคัดเลือกแบบคัดออก (Tournament Selection)
- การคัดเลือกแบบจัดอันดับ (Rank Selection)

รูปแบบการคัดเลือกจะมีการเลือกใช้ที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของข้อมูลที่จะใช้หาคำตอบในการวิเคราะห์หาคำตอบของระบบไฟฟ้ากำลังจะใช้การคัดเลือกแบบคัดออก ลักษณะเป็นการสุ่มจับคู่ประชากร (Tournament size = 2) เปรียบเทียบคะแนน และ กำจัดประชากรที่มีคะแนนต่ำกว่าออก กระบวนการนี้จะส่งผลให้จำนวนประชากรลดลงครึ่งหนึ่ง แต่จะถูกสร้างในกระบวนการครอสโอเวอร์ (Crossover) ในหัวข้อที่ 5 เพื่อให้ประชากรมีจำนวนคงที่ในทุกๆรุ่นของประชากร (Generation)

2.3.5 กระบวนการครอสโอเวอร์ (Crossover)

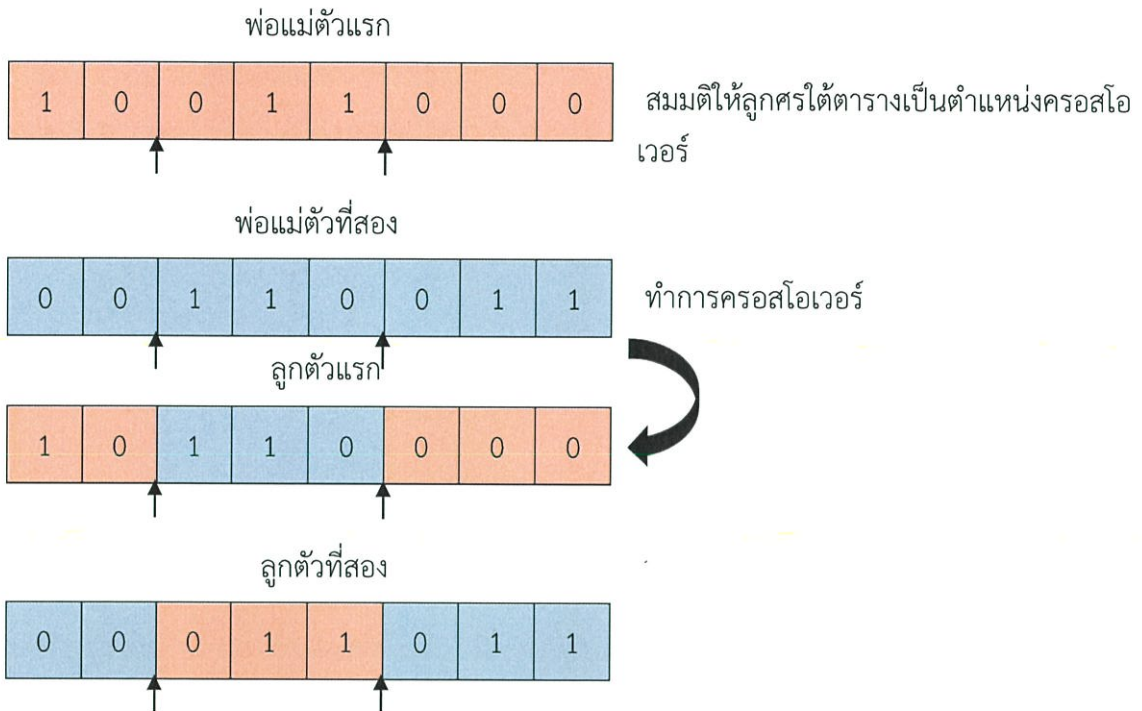
กระบวนการครอสโอเวอร์นั้น เป็นกระบวนการสร้างประชากรรุ่นใหม่ ที่เหมือนกันกับกระบวนการทางชีวภาพ เพื่อให้ได้ประชากรรุ่นใหม่ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากรุ่นก่อน โดยมีต้นแบบมาจากประชากรพ่อ และ แม่ นั้นเอง กระบวนการครอสโอเวอร์นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

- การครอสโอเวอร์แบบตำแหน่งเดียว (One-point crossover)
- การครอสโอเวอร์แบบสองตำแหน่ง (Two-point crossover)
- การครอสโอเวอร์แบบตัดต่อ (Cut and splice crossover)
- การครอสโอเวอร์รูปแบบเดียวกัน (Uniform crossover)
- การครอสโอเวอร์แบบผสม (Blend crossover: BLX-alpha)

โดยในกระบวนการที่เราจะทำในปริณญาณิพนธ์เล่มนี้ เราได้ใช้การครอสโอเวอร์แบบสองตำแหน่ง สำหรับตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็ม และใช้การครอสโอเวอร์แบบผสม สำหรับตัวแปรที่มีจุดทศนิยม

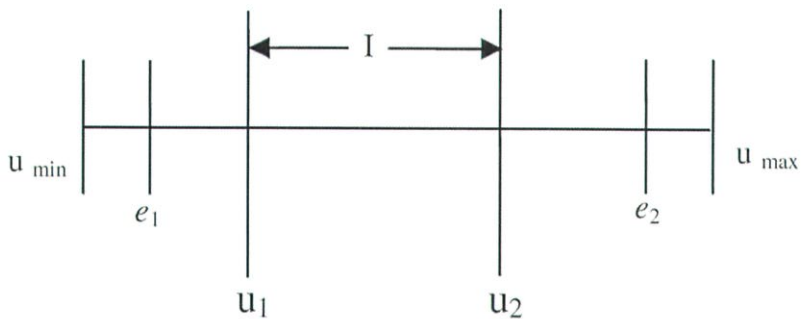
กระบวนการครอสโอเวอร์แบบสองตำแหน่งนั้น กระทำได้โดยเริ่มจากการแปลงค่าของตัวแปรนั้นๆให้อยู่ในเลขฐานสองก่อน แล้วนำเลขฐานสองที่ได้นั้นมาเป็นจำนวนของทั้งสองประชากร

หลังจากนั้นจึงทำการสุ่มตำแหน่งครอสโอเวอร์ (Crossover point) เพื่อใช้เป็นรูปแบบในการครอสโอเวอร์ (Crossover mask) ดังตัวอย่าง



รูปที่ 2.9 การแสดงการครอสโอเวอร์แบบสองจุด

จะสังเกตได้ว่าการครอสโอเวอร์แบบสองตำแหน่งได้นำแต่ละส่วนของพ่อกับแม่มาผสมกัน ให้ได้ประชากรลูกออกมาดังรูปที่ 2.9 ที่แสดงด้านบน



รูปที่ 2.10 การแสดงการครอสโอเวอร์แบบผสม

กระบวนการครอสโอเวอร์แบบผสม (Blend crossover : $BLX-\alpha$) เป็นการครอสโอเวอร์เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งประชากรลูกที่แตกต่างจากพ่อแม่ แต่ยังคงความเหมือนประชากรพ่อแม่อยู่ โดย

จะมีอัตราส่วนความเหมือนเป็น แอลฟา (α) ซึ่งประชากรลูกจะมีค่าออกห่างจากประชากรพ่อและแม่ไปตามความห่างของพ่อและแม่ คุณด้วยอัตราส่วนแอลฟาดังตัวอย่าง

จากรูปที่ 2.10

ให้ u_{\min} และ u_{\max} เป็นขอบเขตสูงสุด และต่ำสุดของค่าประชากร

ให้ u_1 และ u_2 เป็นประชากรพ่อและแม่

ให้ e_1 และ e_2 เป็นขอบเขตของประชากรลูก

ให้ l เป็นระยะความห่างระหว่างประชากรพ่อและแม่ ($l = u_2 - u_1$)

หากเรามีประชากรพ่อและแม่แล้ว เราสามารถหาขอบเขตของประชากรลูกได้ดังสมการ

$$e_1 = u_1 - l\alpha, \quad e_2 = u_2 + l\alpha \quad (2.40)$$

หลังจากนั้น จะทำการสุ่ม offspring ออกมาจากช่วงระยะระหว่าง e_1 กับ u_1 และระยะระหว่าง e_2 กับ u_2

2.3.6 การกลายพันธุ์ (Mutation)

การกลายพันธุ์ในกระบวนการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น มีจุดประสงค์เพื่อให้คงความไม่เหมือนกันไว้บ้างระหว่างกระบวนการ เนื่องจากหากไม่มีกระบวนการนี้ ประชากรทุกตัว จะมีค่าเท่ากัน หรือ เป็นตัวเดียวกันในรุ่นสุดท้าย แนวคิดดังกล่าวนี้ ล้วนได้มาจากกระบวนการพัฒนาการตามธรรมชาติในทางชีววิทยา

ซึ่งในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น มีการกลายพันธุ์หลายแบบด้วยกัน ซึ่งกระบวนการกลายพันธุ์แบบที่เราจะใช้ในที่นี้ คือ การกลายพันธุ์แบบเป็นรูปแบบ (Uniform mutation)

เริ่มจากการกำหนดอัตราการกลายพันธุ์ ว่าจะให้มีความน่าจะเป็นที่จะกลายพันธุ์เท่าไร หากรุ่นนั้นๆ ได้กลายพันธุ์ ก็จะใช้ การสุ่มตัวแปรของประชากรขึ้นมาหนึ่งตัวแปร หากตัวแปรนั้นเป็นตัวแปรประเภทจำนวนเต็ม ก็ให้ทำการสุ่มว่าจะเพิ่ม หรือลดค่าของตัวแปรนั้นเป็นจำนวน 1 หน่วย หากตัวแปรนั้น เป็นตัวแปรประเภทที่มีจุดทศนิยม ก็ให้ทำการสุ่มค่าของตัวแปรนั้นขึ้นมาใหม่ โดยให้อยู่ระหว่างขอบเขตต่ำสุด และสูงสุด ของตัวแปรนั้นๆ

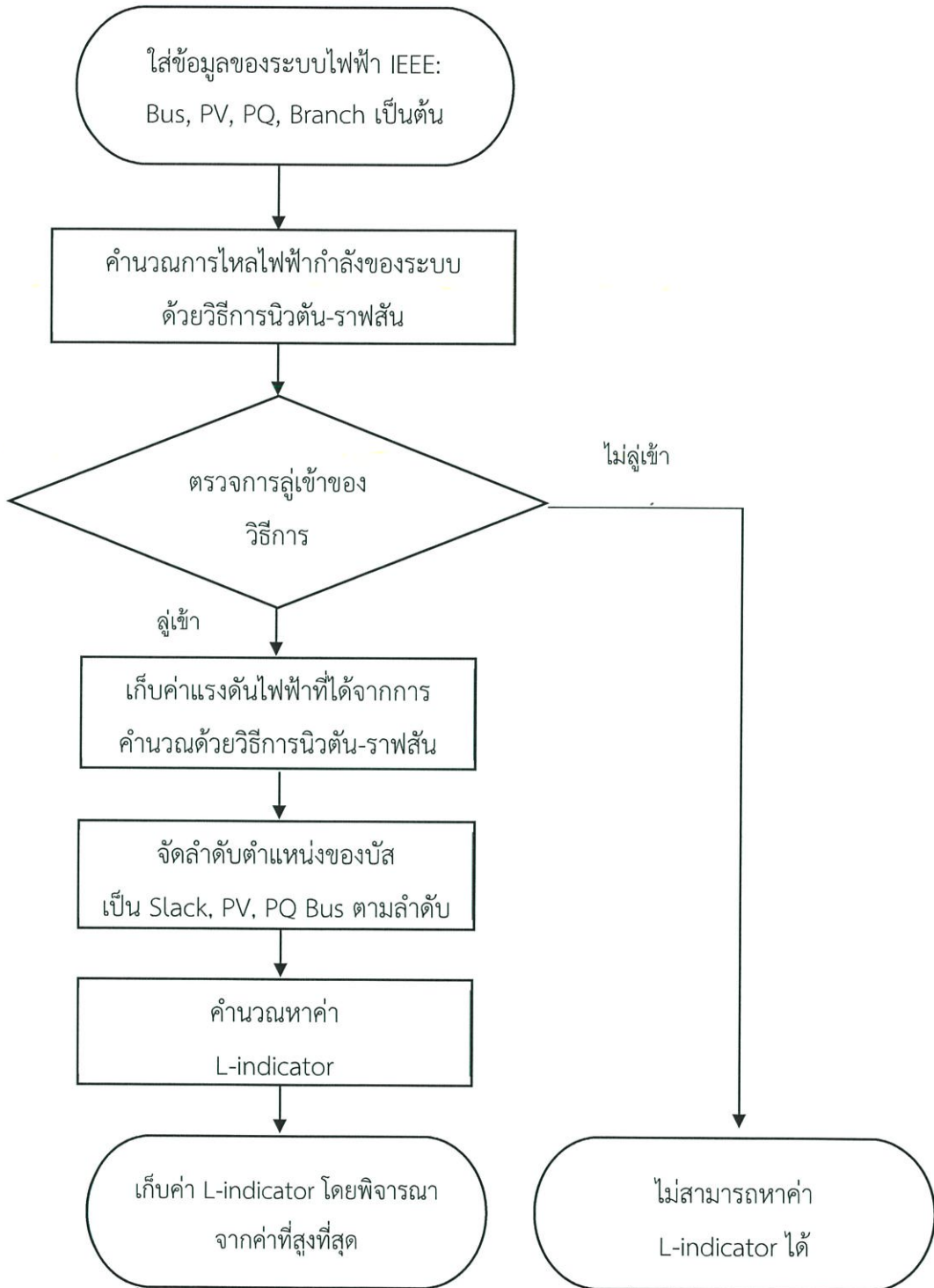
บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

ในปฏิญานิพนธ์นี้การออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการพัฒนาโปรแกรมของขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมและพัฒนาโปรแกรมคำนวณค่า L-Indicator โดยใช้โปรแกรม MATLAB และส่วนของการทดลองเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีต่างๆ ซึ่งในส่วนนี้จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่บัสเดียว และทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่หลายบัส โดยรูปที่ 3.1-3.2 แสดงแผนผังของการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณค่า L-indicator และ PV Curve รูปที่ 3.3-3.4 แสดงแผนผังของโปรแกรมขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดและการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณค่า L-Indicator เพื่อการประมาณค่าดัชนีชี้วัดค่าเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบและทำการแก้ปัญหาระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non – linear equation system) ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีนิวตัน ราบสัน และรูปที่ 3.5 แสดงแผนผังโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่บัสเดียวและหลายบัส โดยใช้ระบบอ้างอิง Case IEEE 9 bus, Case IEEE 30 bus, Case IEEE 57 bus, Case Thailand 124 bus มาทำการศึกษาในการทดลองและแสดงผล โดยจะแบ่งเป็น 3 การทดลอง

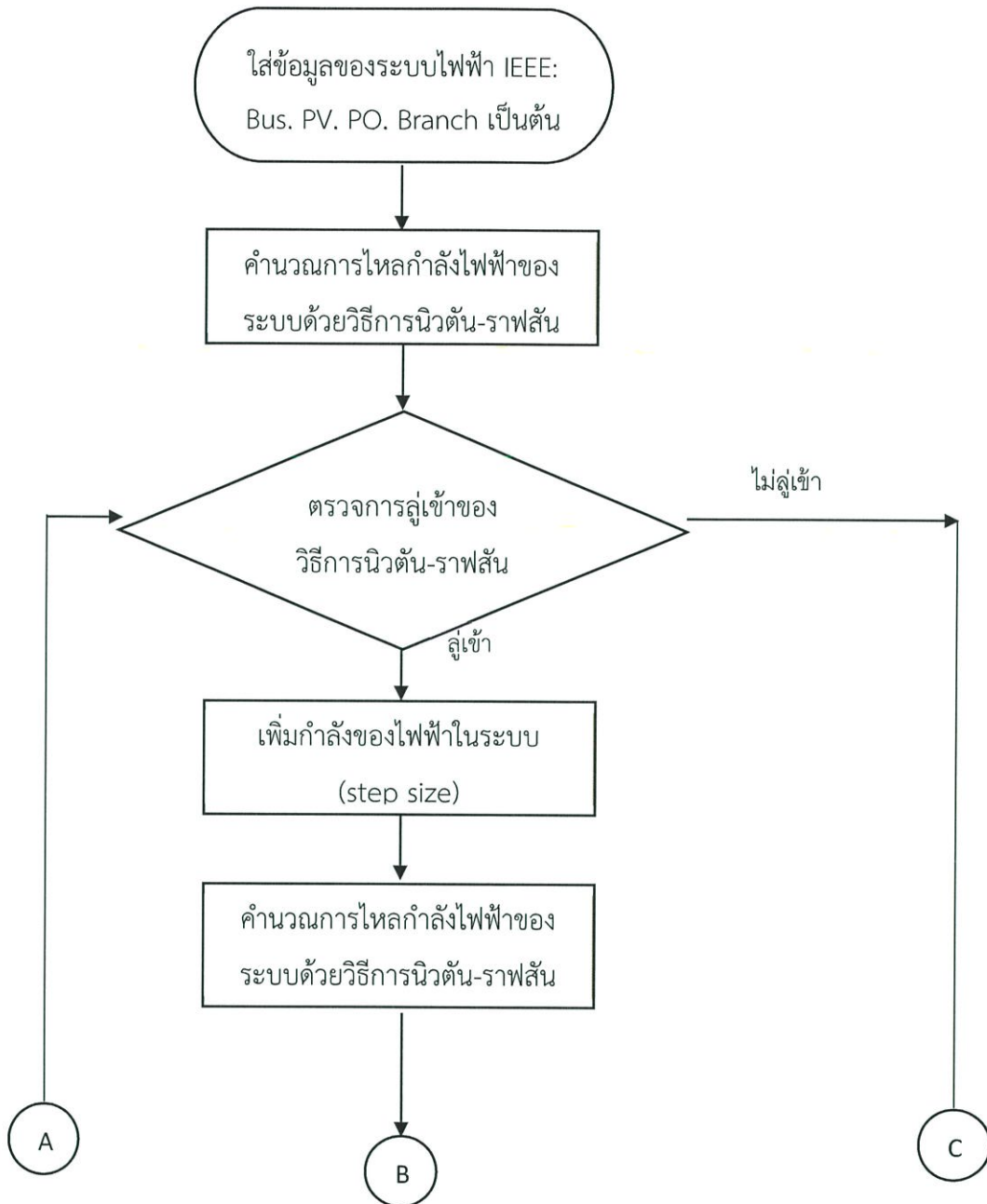
3.1 แผนผังขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม

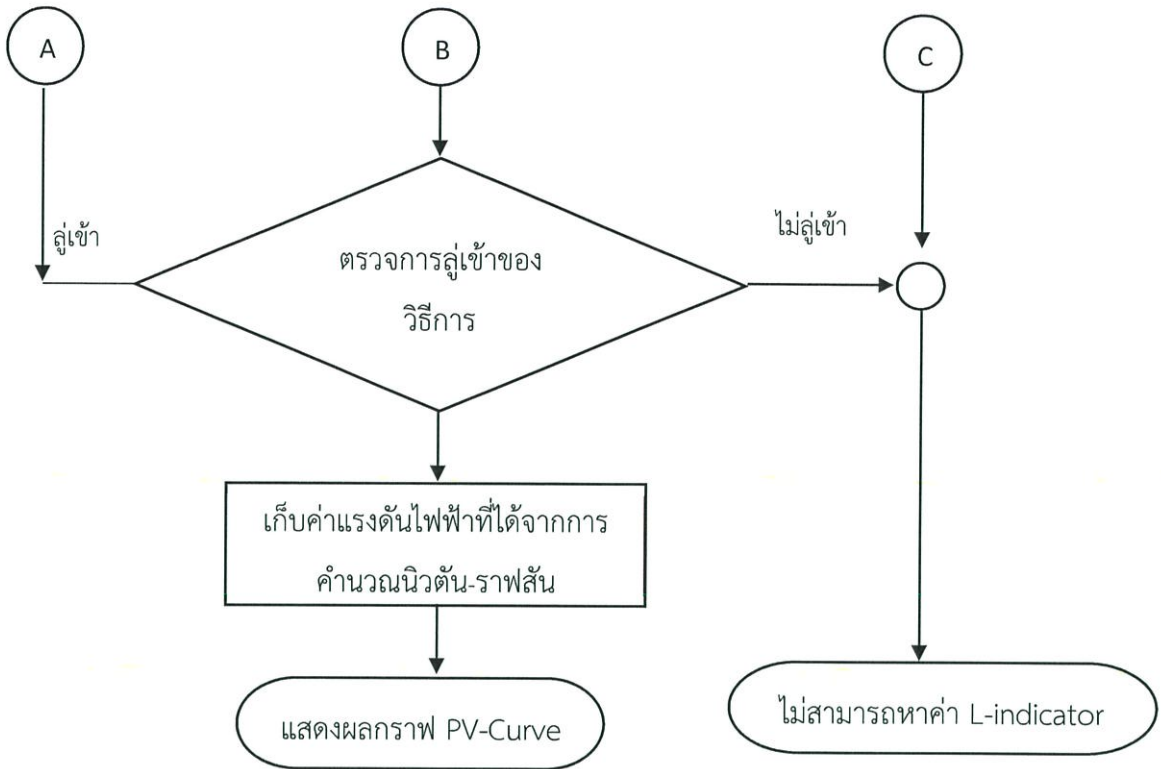
3.1.1 แผนผังการคำนวณหาค่า L-indicator



รูปที่ 3.1 แสดง Flowchart ของการพัฒนาโปรแกรมเพื่อเก็บค่า L - Indicator

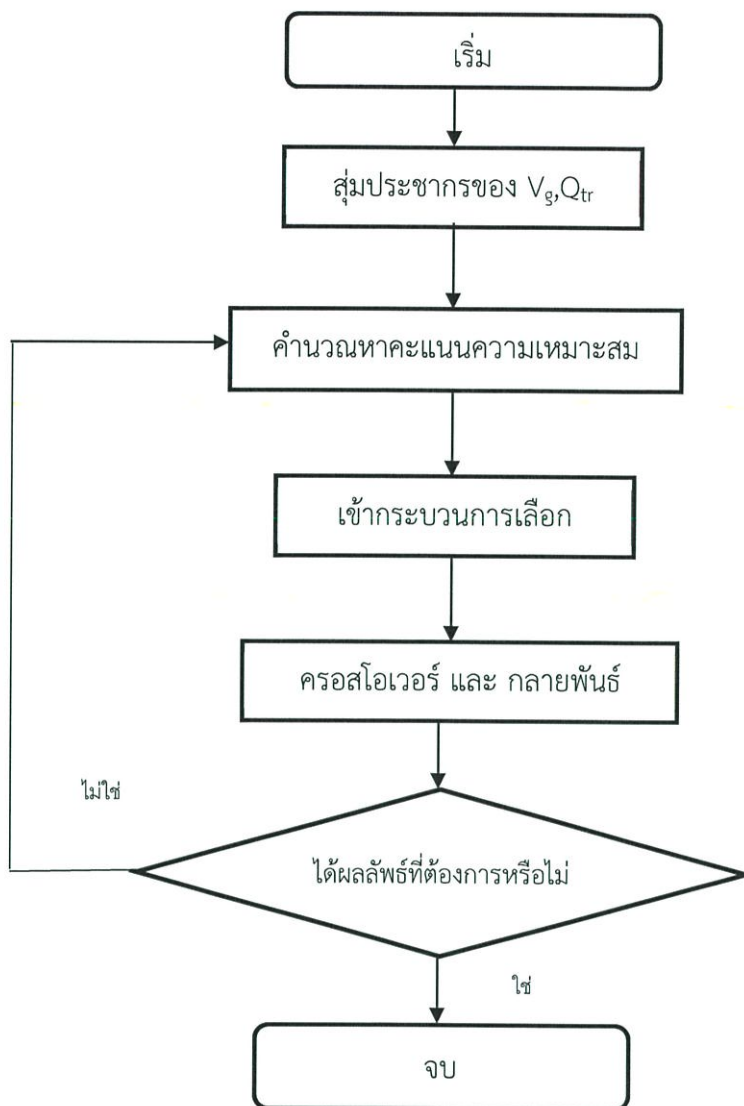
3.1.2 แผงผังโฟลว์ชาร์ตของการคำนวณและแสดงผล PV Curve





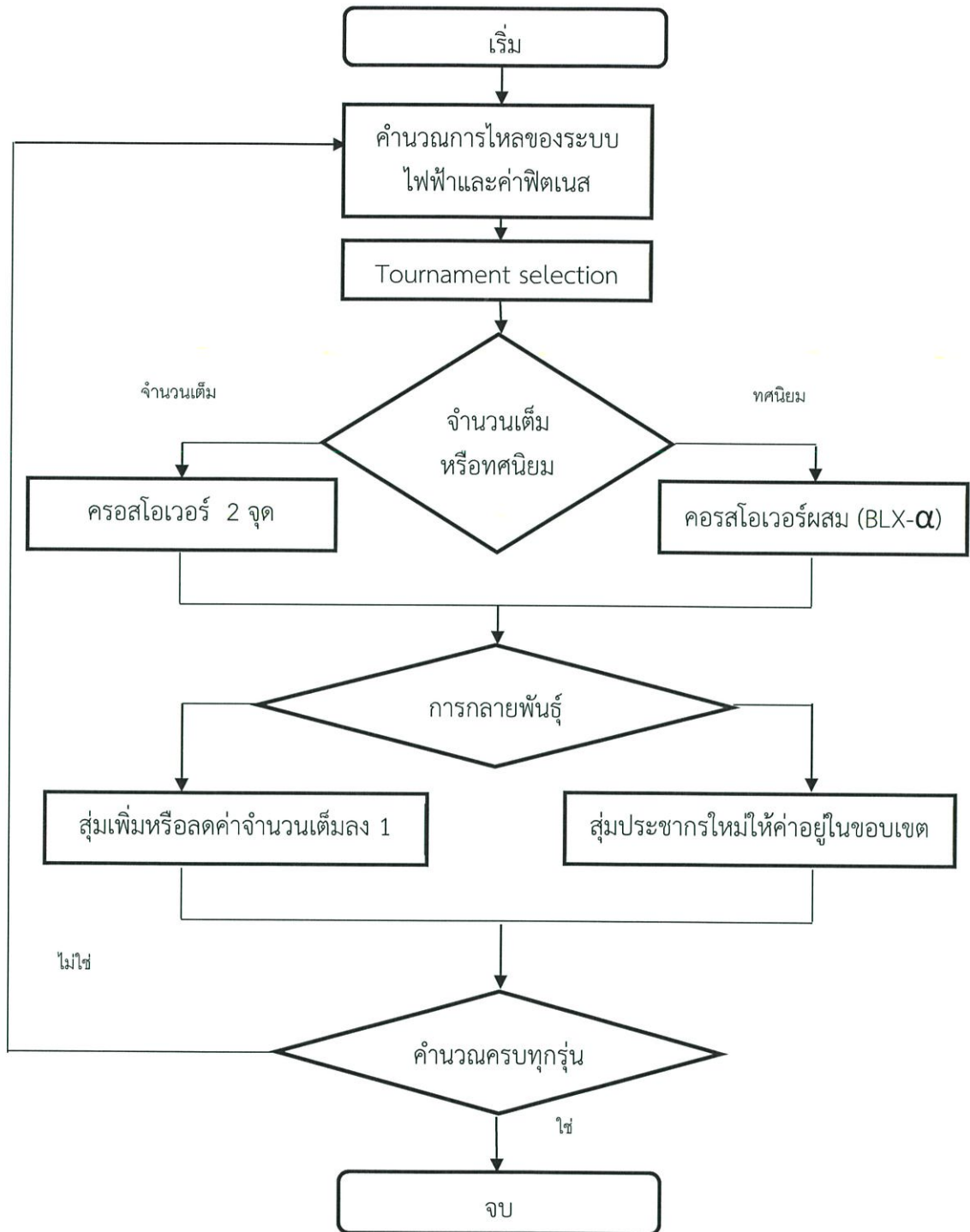
รูปที่ 3.2 Flowchart ของการพัฒนาโปรแกรมแสดงผลกราฟ PV Curve

3.1.3 แผงผังโพลีชาร์ตของหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

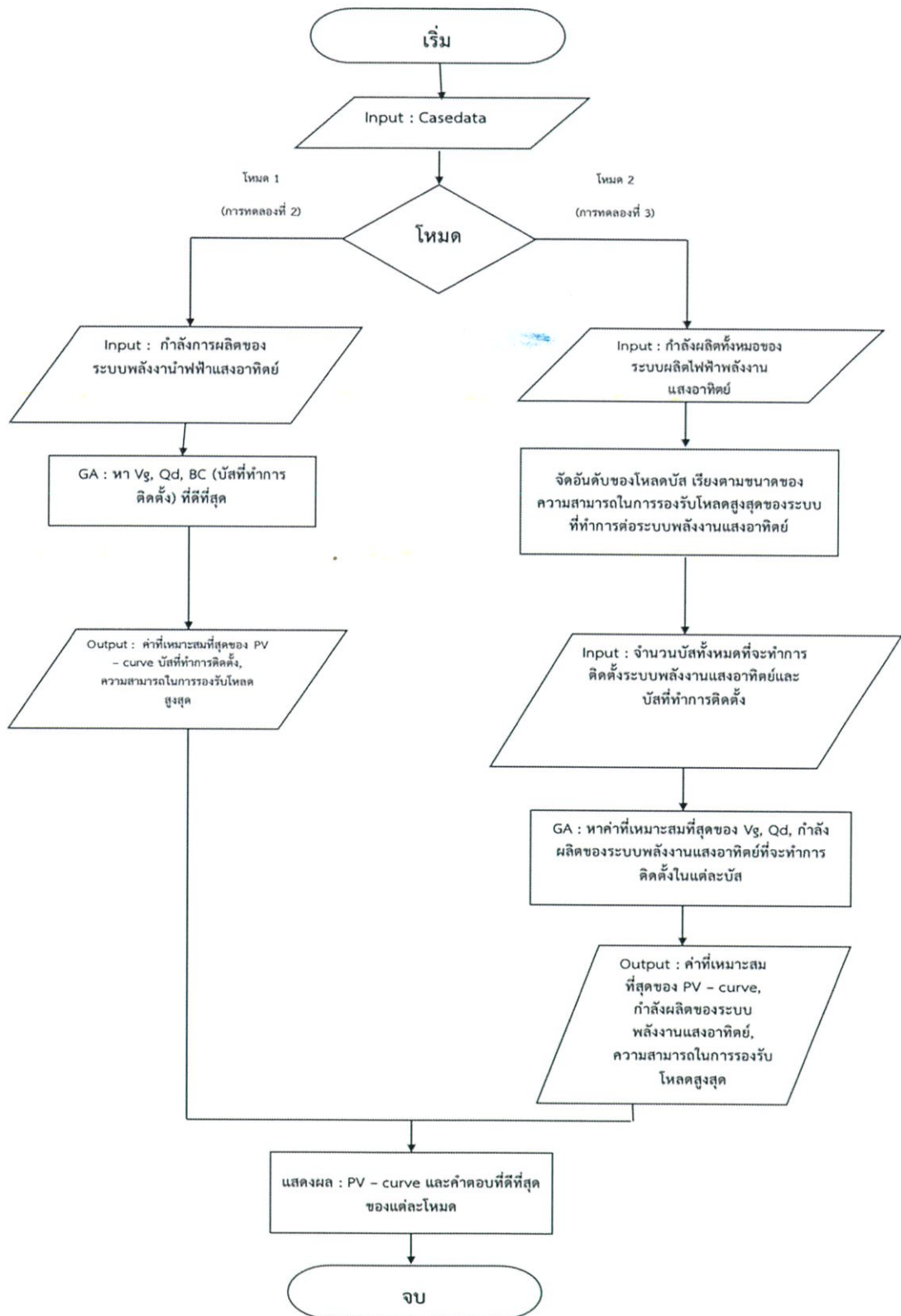


รูปที่ 3.3 Flowchart ของหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

3.1.4 แผนผังการทำงานของวิธีการขั้นตอนเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 3.4 แสดง Flowchart ของการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 3.5 แสดง Flowchart ของการทดลองที่ 2 และ 3

3.2 ออกแบบการทดลอง

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการพัฒนาของระบบไฟฟ้ากำลัง

1. กำลังไฟฟ้าของการผลิต (P_g)
2. แรงดันของการผลิต (V_g)
3. แรงดันของทุกบัส (V)
4. กำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบที่บัสภาระทางไฟฟ้าต่างๆ (Q_d)

3.2.1 การทดลองที่ 1

วัตถุประสงค์

ศึกษา PV Curve และหาบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE 9 bus, IEEE 30 bus, IEEE 57 bus และ Thailand 124 bus.

วิธีการทดลอง

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Initial power flow solution)
2. หาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow solution) โดยใช้วิธีนิวตัน ราวสี่

ในการแก้ปัญหาระบบสมการไม่เชิงเส้น

3. เพิ่มโหลดของระบบโดยการเพิ่มเข้าไปครั้งละ 20 MW (โดยนำไปกระจายให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามอัตราส่วนของขนาดโหลดในแต่ละบัส) แล้วหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จุดถัดไปจนถึงจุดที่ไม่สามารถหาคำตอบให้กับระบบได้ (Critical point)

3.2.2 การทดลองที่ 2

วัตถุประสงค์

ทำการเพิ่มเสถียรภาพของระบบ เพื่อให้ระบบสามารถรับภาระทางไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยใช้กระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ประกอบตัวบ่งชี้แอล (L-index) เพื่อหาผลค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของระบบ โดยใช้วิธีนิวตัน ราวฟสันในการตรวจสอบ การแก้ปัญหาระบบสมการ และทำการทดลองซ้ำ โดยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และเพิ่มตัวแปรกำลังผลิตของพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปในรูปแบบของการติดตั้งที่บัสเดียว(ที่กำลังการผลิต 5, 10, 20 เปอร์เซนต์) ในระบบอ้างอิง case IEEE 9 bus, case IEEE 30 bus

วิธีการทดลอง

1. ทำการกำหนดค่าประชากรชุดแรกเพื่อเริ่มต้นกระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยการสุ่มค่าภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ (V_g, Q_d)
2. ทำการคัดเลือกประชากรมาครั้งหนึ่งด้วยการสุ่มเปรียบเทียบค่าคะแนนความเหมาะสมของประชากร (หาจากตัวบ่งชี้แอล: L-index ซึ่งได้มากจากการแก้ระบบสมการและ การตรวจสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการนิวตัน-ราวฟสัน)
3. ทำการสร้างประชากรรุ่นใหม่จากประชากรรุ่นเก่า ด้วยกระบวนการ คrossover
4. ทำการกลายพันธุ์โดยการสุ่มตามโอกาสในการเกิดการกลายพันธุ์
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2. ถึง 4. จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด
6. เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมแล้ว ทำการทดลองซ้ำโดยเพิ่มตัวแปร BC เข้าไปในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งจะมีสองรูปแบบ คือเป็นตัวแปร BC สำหรับบัสเดียว
7. บันทึกค่าทั้งหมดเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

3.2.3 การทดลองที่ 3

วัตถุประสงค์

ทำการเพิ่มเสถียรภาพของระบบ เพื่อให้ระบบสามารถรับภาระทางไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยใช้กระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ประกอบตัวบ่งชี้แอล (L-index) เพื่อหาผลค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของระบบ โดยใช้วิธีนิวตัน ราฟสันในการตรวจสอบ การแก้ปัญหาระบบสมการ และทำการทดลองซ้ำ โดยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และเพิ่มตัวแปรกำลังผลิตของพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปในรูปแบบของการติดตั้งหลายบัส(ที่กำลังการผลิต 5, 10, 20 เปอร์เซนต์) ในระบบอ้างอิง case IEEE 30 bus, case IEEE 57 bus และ case Thailand 124 bus.

วิธีการทดลอง

1. ทำการกำหนดค่าประชากรชุดแรกเพื่อเริ่มต้นกระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยการสุ่มค่าภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ (V_g, Q_d)
2. ทำการคัดเลือกประชากรมาครั้งหนึ่งด้วยการสุ่มเปรียบเทียบค่าคะแนนความเหมาะสมของประชากร (หาจากตัวบ่งชี้แอล: L-index ซึ่งได้มากจากการแก้ระบบสมการและ การตรวจสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการนิวตัน ราฟสัน)
3. ทำการสร้างประชากรรุ่นใหม่จากประชากรรุ่นเก่า ด้วยกระบวนการ ครอสโอเวอร์
4. ทำการกลายพันธุ์โดยการสุ่มตามโอกาสในการเกิดการกลายพันธุ์
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2. ถึง 4. จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด
6. เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมแล้ว ทำการทดลองซ้ำโดยเพิ่มตัวแปร percent เข้าไปในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งจะมีสองรูปแบบ คือเป็นตัวแปร percent สำหรับติดหลายบัส
7. บันทึกค่าทั้งหมดเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

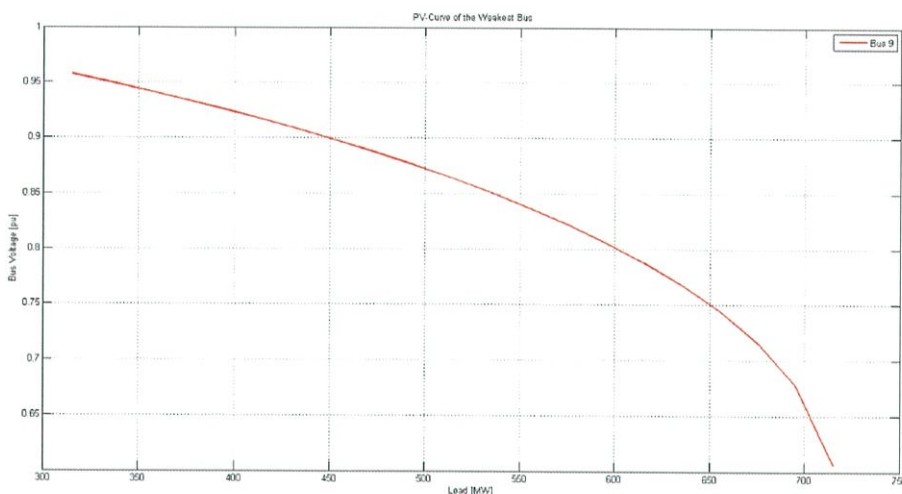
บทที่ 4

ผลการทดลอง

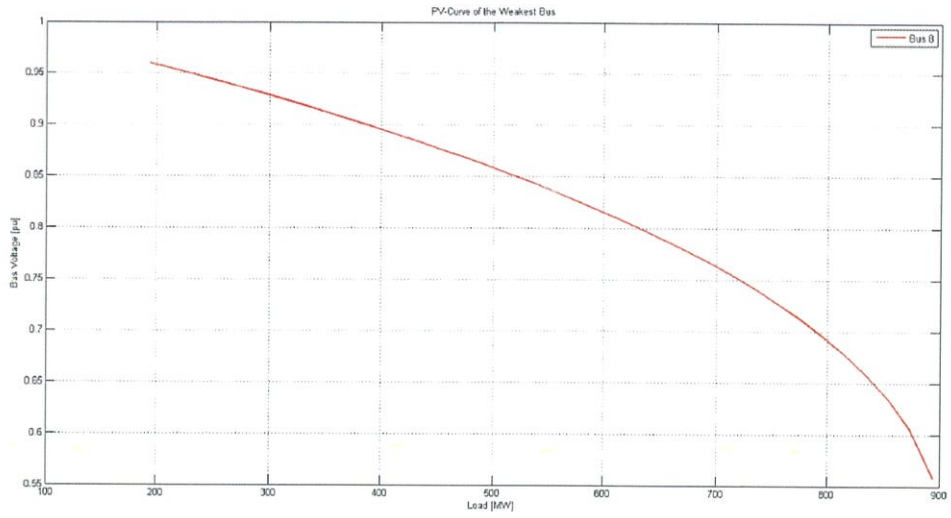
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองซึ่งประกอบด้วยการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นการคำนวณ PV Curve เพื่อหาบัสที่อ่อนแอที่สุดและค่า Load Margin ของระบบไฟฟ้ากำลัง การทดลองที่ 2 เป็นการทดสอบความสามารถของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการปรับปรุงเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม โดยจะพิจารณากรณีที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งเดียว การทดลองที่ 3 เป็นการทดสอบความสามารถของโปรแกรม เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่จะเป็นการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่หลายตำแหน่ง

4.1 ผลการทดลองที่ 1

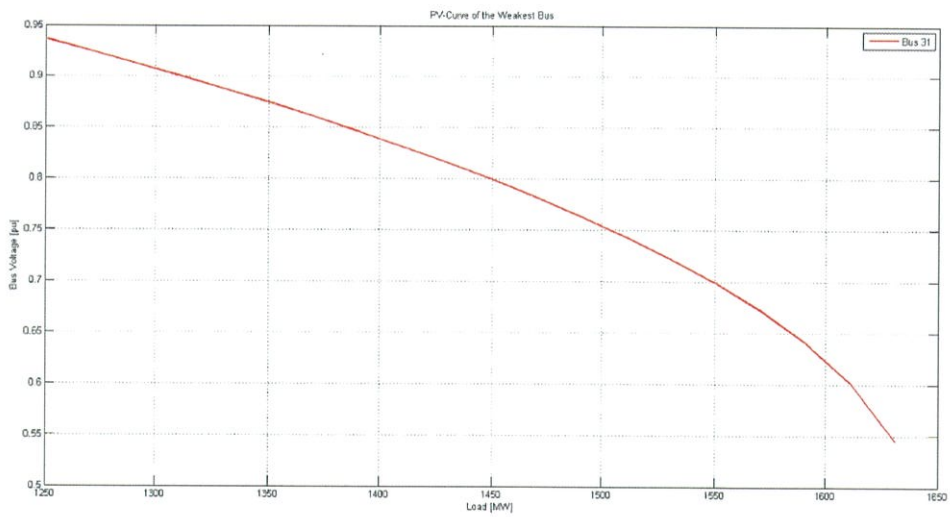
ทำการคำนวณ PV Curve เพื่อหาบัสที่อ่อนแอที่สุดและค่า Load Margin ของระบบ ซึ่งจะบ่งบอกถึงเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าและความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมของระบบ โดยทดสอบกับระบบจำลอง IEEE 9 bus, IEEE 30 bus, IEEE 57 bus และ Thailand 124 bus



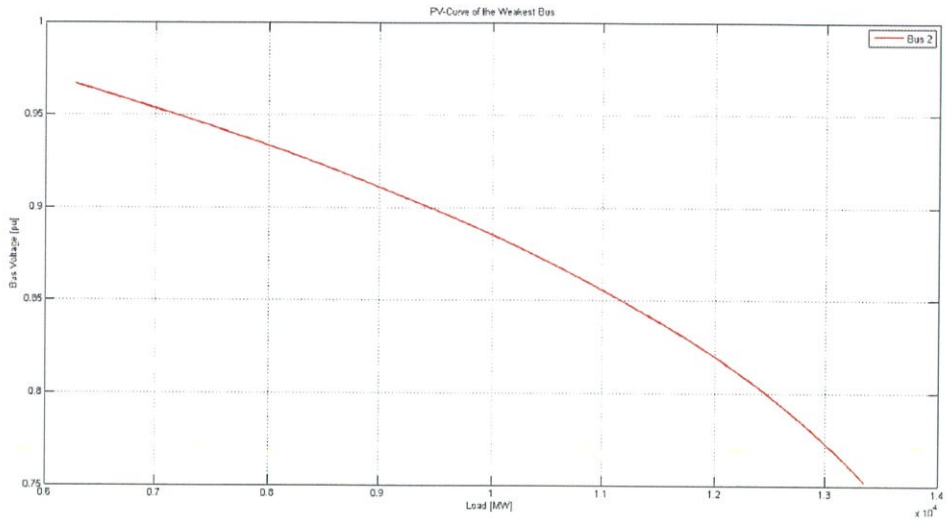
รูปที่ 4.1 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 9 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 9)



รูปที่ 4.2 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 8)



รูปที่ 4.3 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 31)



รูปที่ 4.4 PV Curve ของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 bus ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 2)

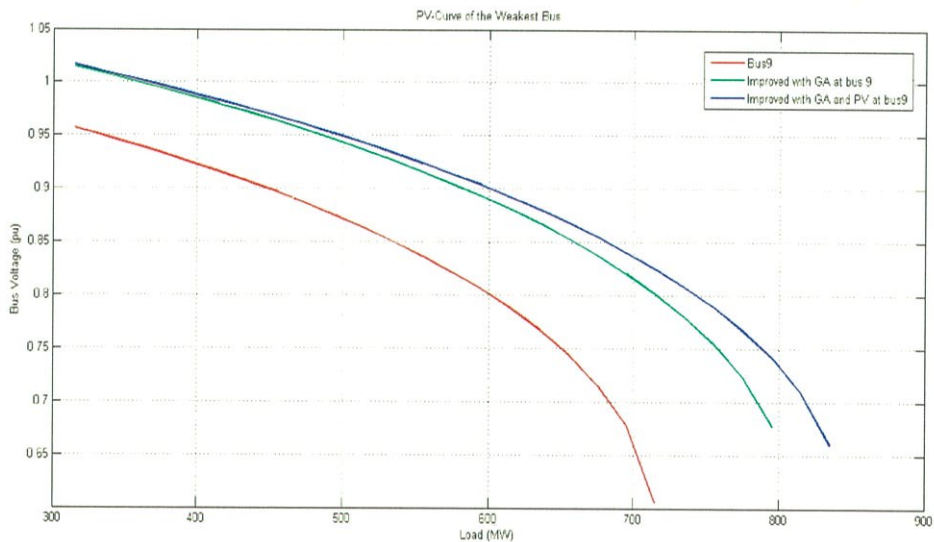
จากรูปที่ 4.1-4.4 จุดเริ่มต้นของกราฟ PV Curve คือจุดดำเนินการที่สภาวะโหลดปกติ ซึ่งหาได้จากการแก้ระบบสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow equations) โดยใช้วิธีนิวตัน ราบสัน ในการหาค่าตอบ จากนั้นทำการเพิ่มโหลดของระบบโดยคงค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ที่จุดเริ่มต้นไว้และหาจุดค่าตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่ และทำซ้ำจนถึงจุดที่ไม่สามารถหาค่าตอบของระบบได้ โดยจุดสุดท้ายของกราฟจะบอกถึงปริมาณโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้ เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical point) และจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าระบบไฟฟ้า IEEE 9 bus สามารถรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดได้ 715 MW ระบบไฟฟ้า IEEE 30 bus สามารถรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดได้ 894.2 MW ระบบไฟฟ้า IEEE 57 bus สามารถรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดได้ 1630.83 MW และระบบไฟฟ้า Thailand 124 bus สามารถรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดได้ 13347.2 MW ทั้งนี้กราฟ PV Curve ที่คำนวณได้ยังสามารถใช้ระบุบัสที่อ่อนแอที่สุด (The weakest bus) ของระบบ ซึ่งคือบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด ณ จุดวิกฤต จากผลการทดลองพบว่าบัสที่อ่อนแอที่สุดของระบบ IEEE 9 bus คือ บัสที่ 9 ,ระบบ IEEE 30 bus คือ บัสที่ 8 ระบบ IEEE 57 bus คือ บัสที่ 31 และ สำหรับระบบจำลองประเทศไทย คือ บัสที่ 2

4.2 ผลการทดลองที่ 2

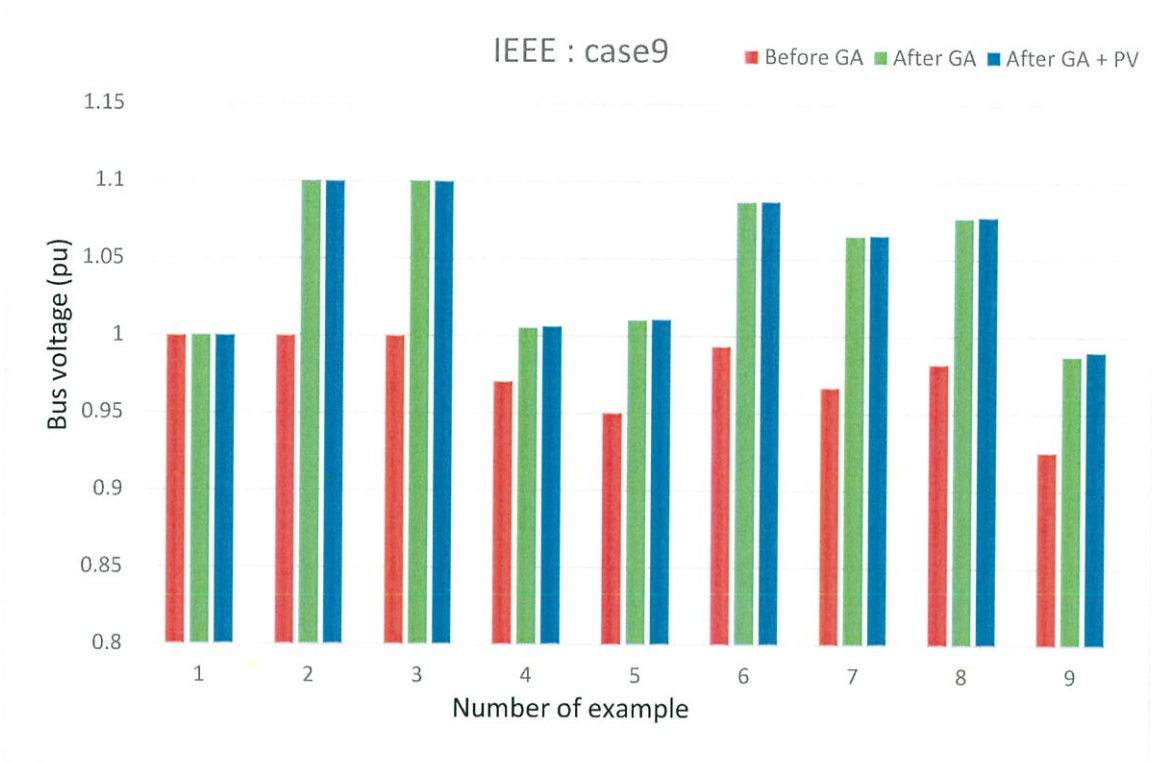
ทำการปรับปรุงรูปแบบการดำเนินการของระบบโดยผ่านกระบวนการขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมโดยจะทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของ ระดับแรงดันไฟฟ้า จำนวนตัวเก็บประจุขดเคย และ ตำแหน่งการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำการศึกษากรณีที่มีขนาด 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์ของโหลดรวมในระบบจำลอง จากนั้นทำการสร้าง PV Curve เพื่อหาความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดของระบบ โดยทดสอบกับระบบจำลอง IEEE 9 bus และ IEEE 30 bus

ผลการทดลองที่ 2

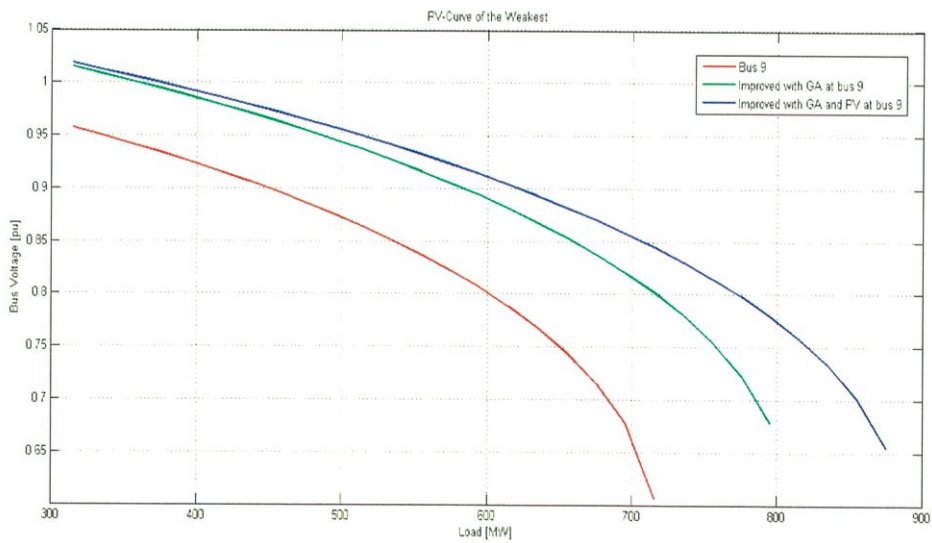
ทดสอบกับ IEEE 9 bus และ IEEE 30 bus โดยติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณ 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์ของโหลดรวมเข้าไปที่บัสที่กระบวนการขั้นตอนวิธีการพันธุกรรมคำนวณได้ โดยพล็อตค่าแรงดันไฟฟ้าของบัส 9 (บัสที่อ่อนแอที่สุด) เทียบกับโหลดรวมของระบบ ของ IEEE 9 และพล็อตแรงดันของบัส 8 (บัสที่อ่อนแอที่สุด) เทียบกับโหลดรวมของระบบของ IEEE 30



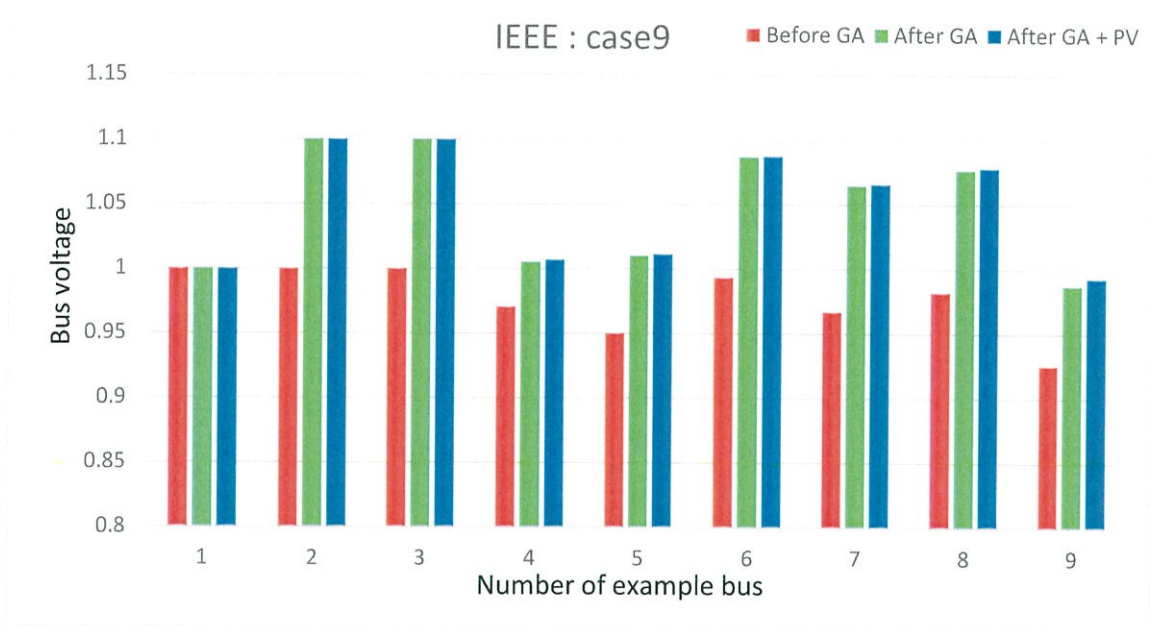
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซนต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus



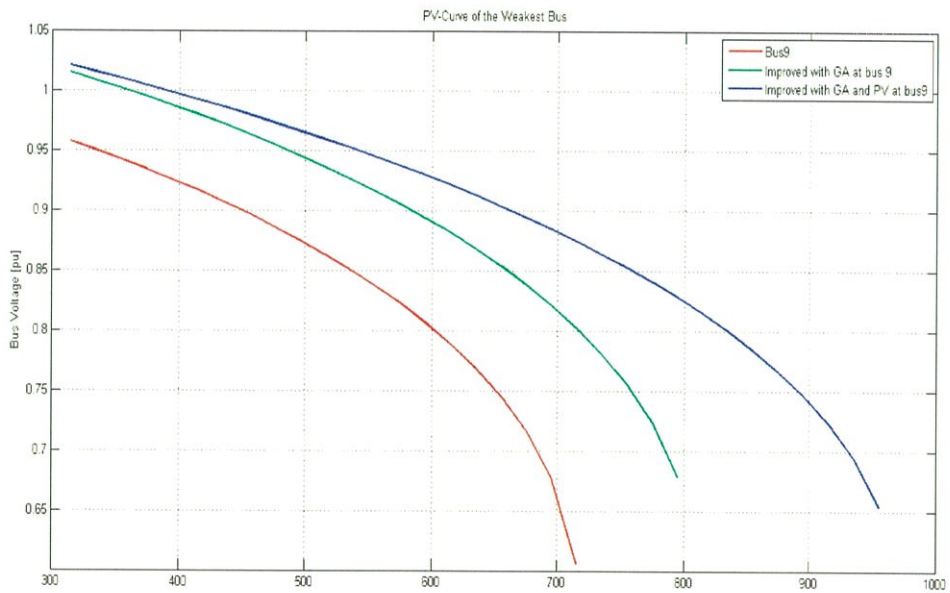
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เพอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus



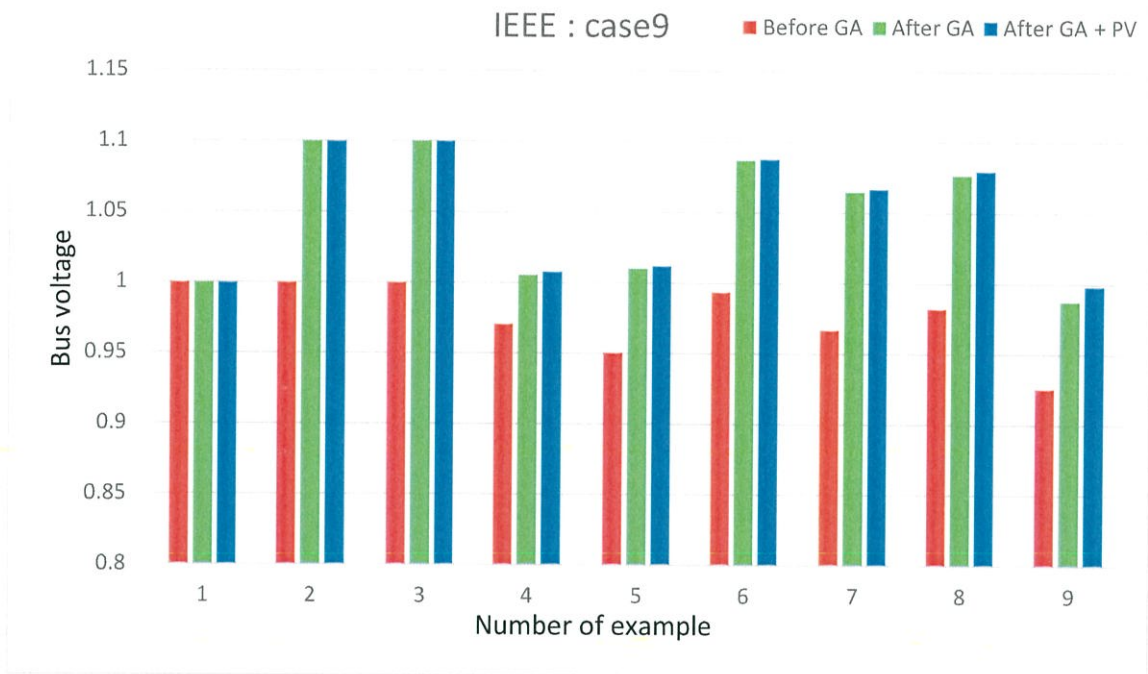
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เพอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus



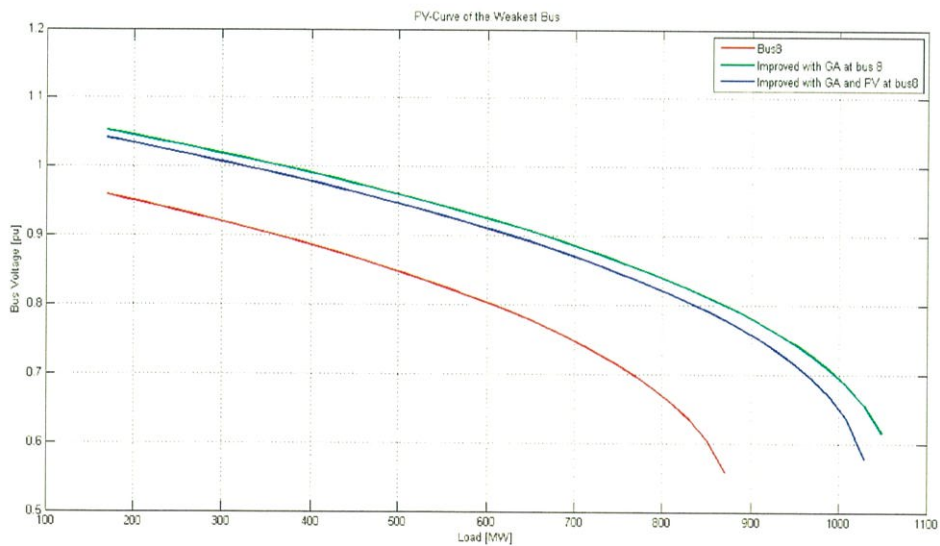
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus



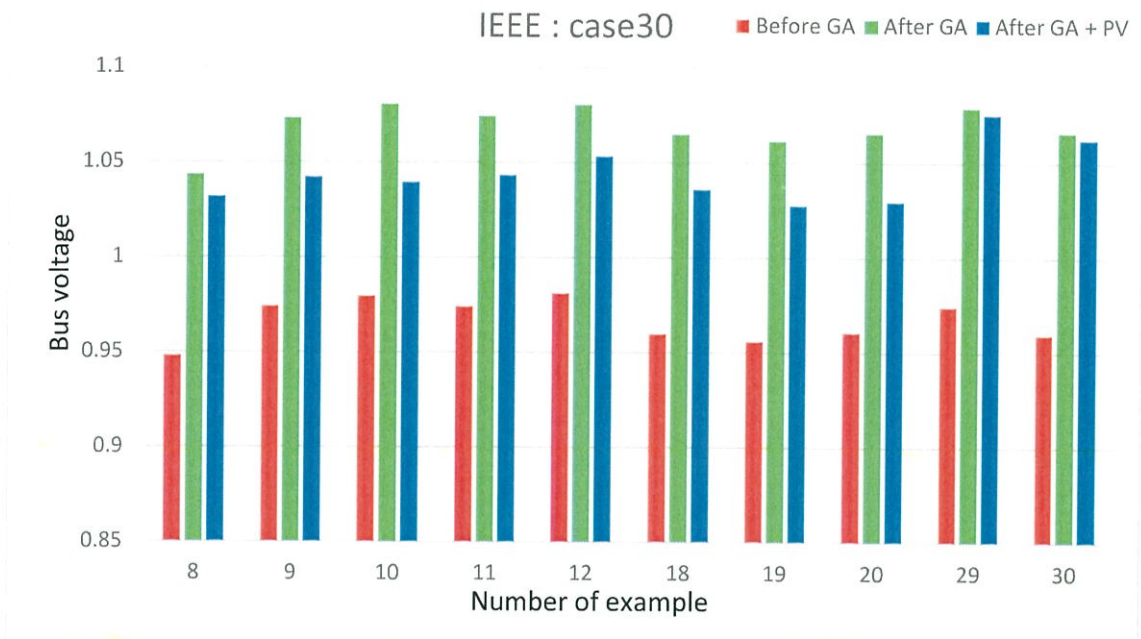
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus



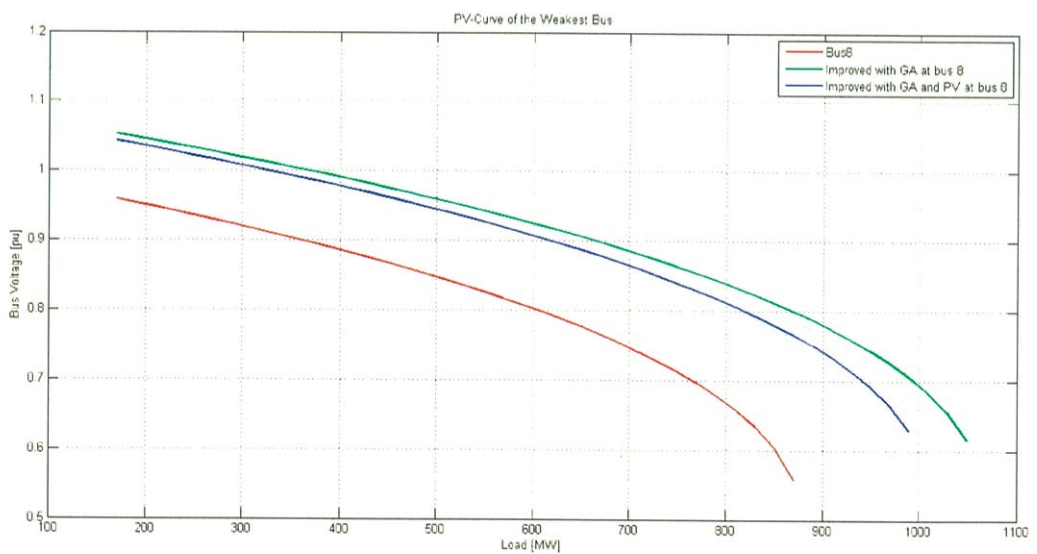
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 9 ของ IEEE 9 bus



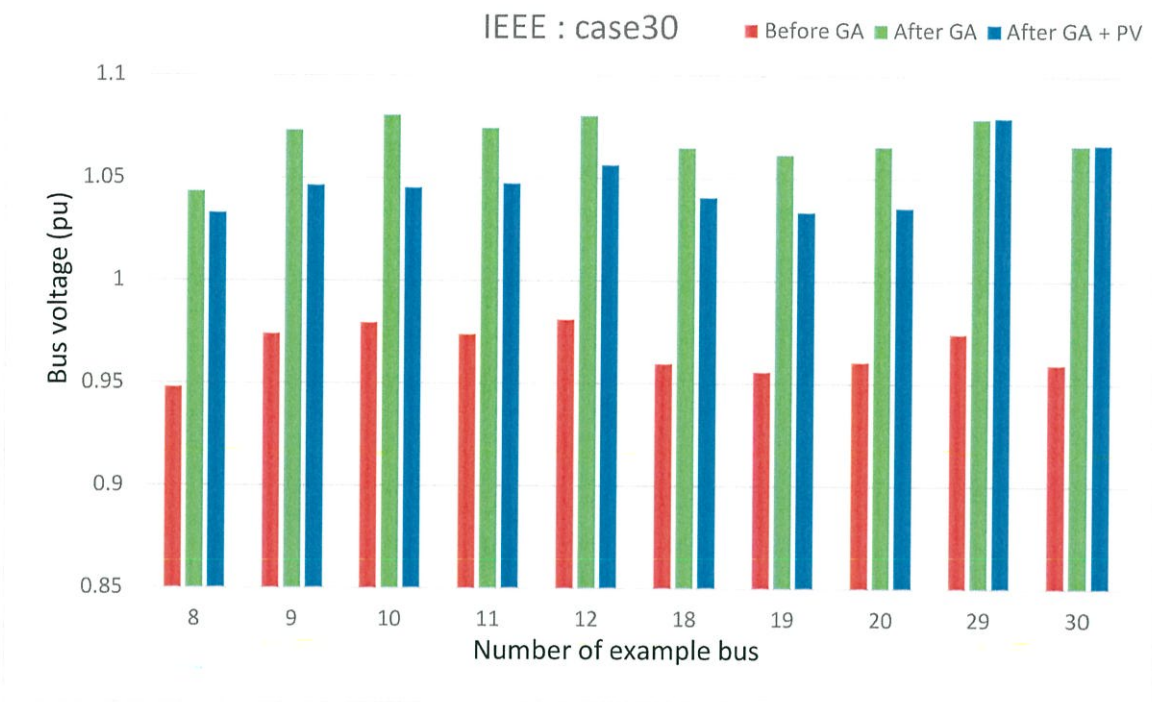
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 8 ของ IEEE 30 bus



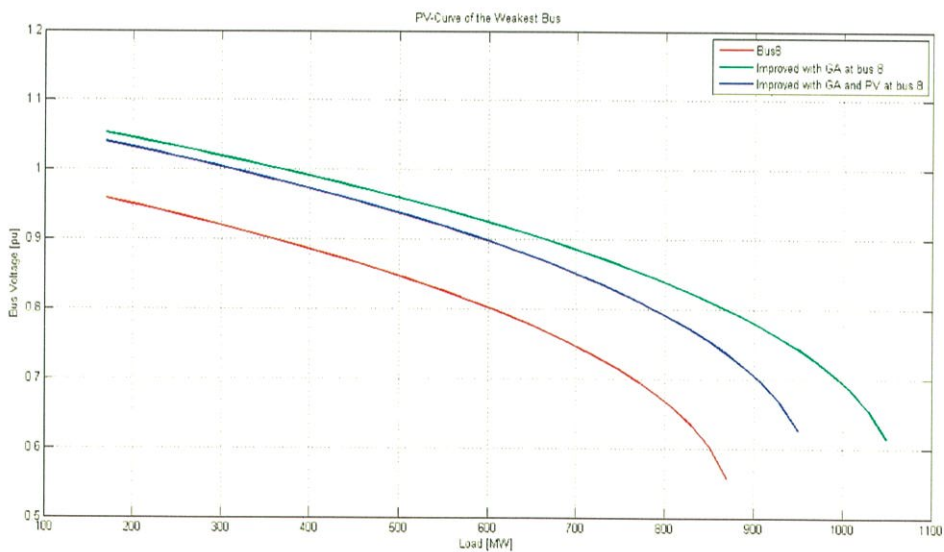
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 8 ของ IEEE 30 bus



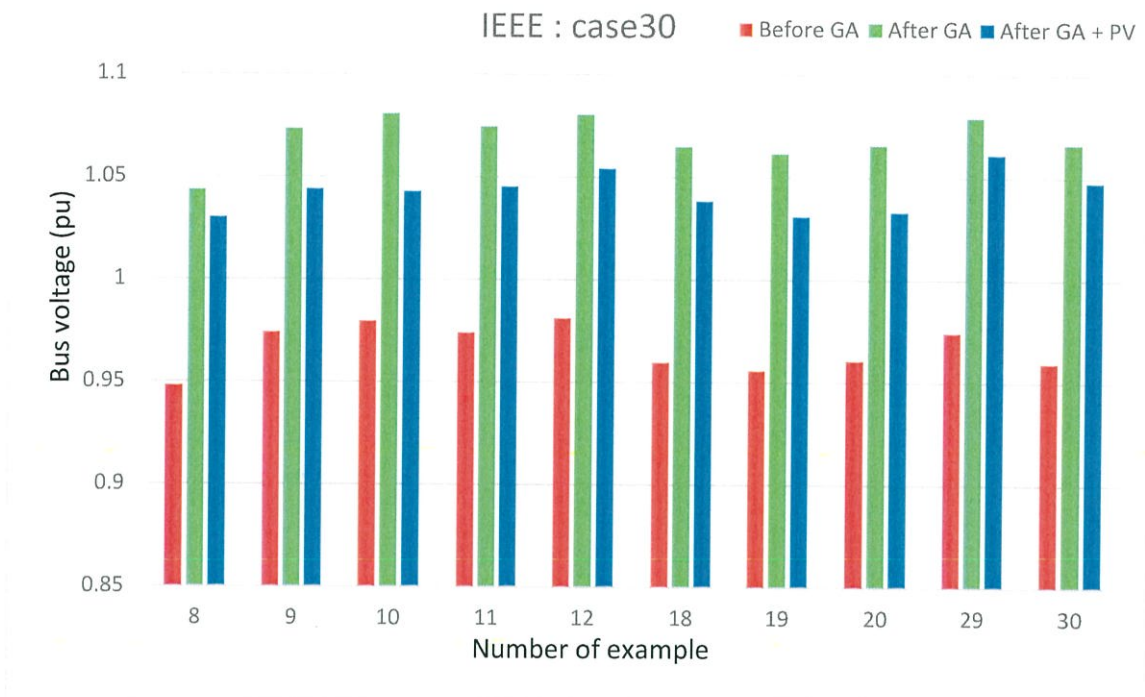
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 8 ของ IEEE 30 bus



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 8 ของ IEEE 30 bus



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 8 ของ IEEE 30 bus



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์เข้าที่บัส 8 ของ IEEE 30 bus

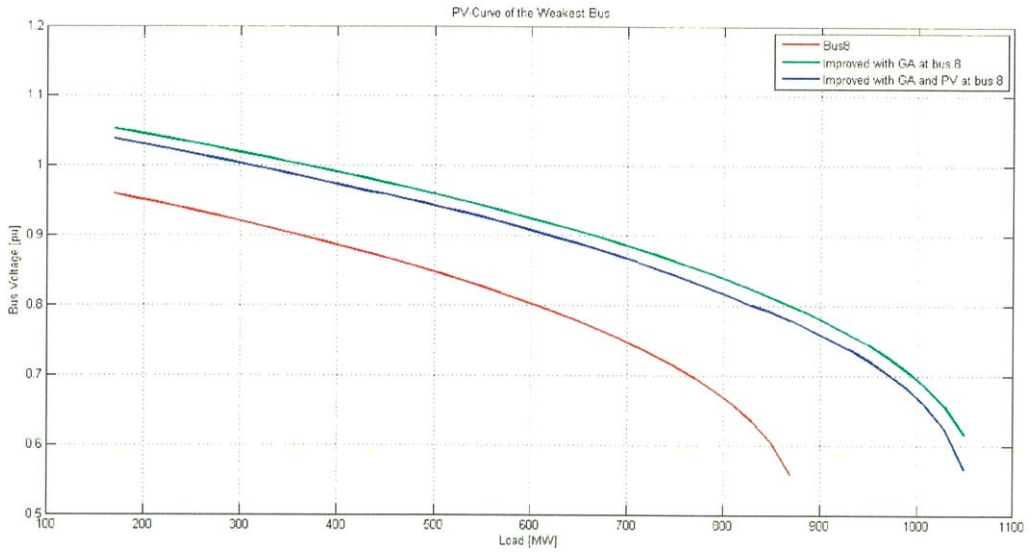
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่บัสต่างๆ ของ IEEE 9 bus

Bus connect	Load margin improvement (MW)				
	Before GA	After GA	After GA + PV		
			5%	10%	20%
4	400	480 (+20%)	500 (+25%)	520 (+30%)	560 (+40%)
5	400	480 (+20%)	500 (+25%)	520 (+30%)	540 (+35%)
6	400	480 (+20%)	480 (+20%)	480 (+20%)	460 (+15%)
7	400	480 (+20%)	480 (+20%)	480 (+20%)	460 (+15%)
8	400	480 (+20%)	480 (+20%)	460 (+15%)	440 (+10%)
9	400	480 (+20%)	520 (+30%)	560 (+40%)	640 (+60%)

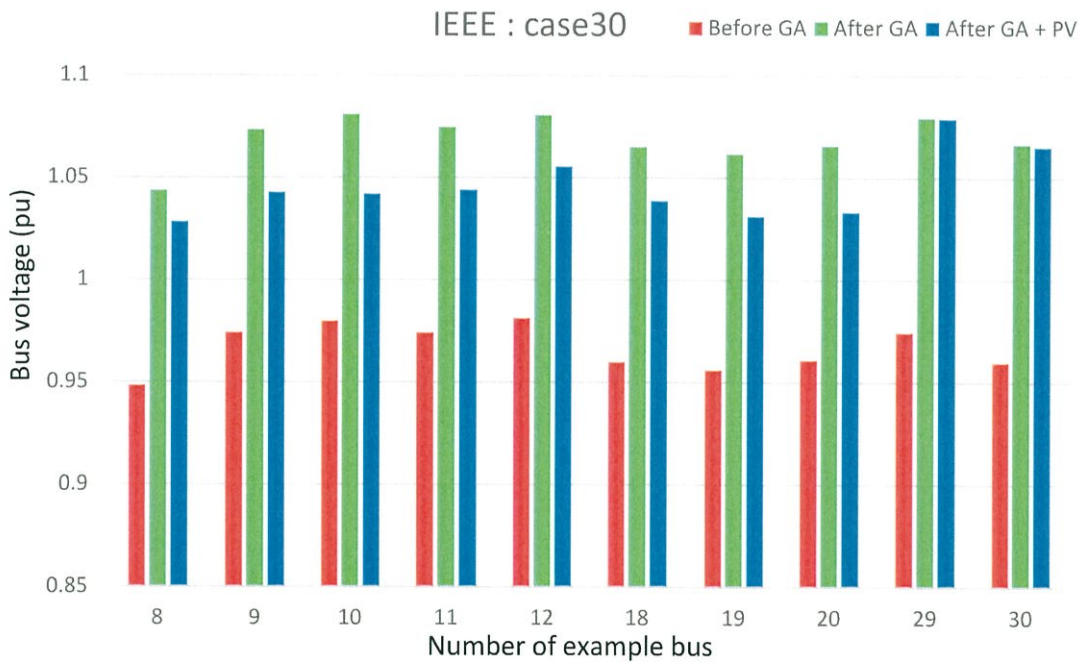
จากการทดลองที่ 2 เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัสต่างๆของ IEEE 9 bus และคำนวณ PV Curve พบว่าการติดตั้งที่บัสต่างกันจะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดของระบบเปลี่ยนแปลงต่างกัันดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าถ้าหากติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมก็จะส่งผลในทางลบกับระบบไฟฟ้ากำลังคือ ได้ความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดน้อยลง และจากการศึกษาพบว่าเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่บัส 9 จะทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้นมากที่สุดตามการคำนวณของกระบวนการขั้นตอนเชิงพันธุกรรมที่ทำให้ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 60 เปอร์เซ็นต์

4.3 ผลการทดลองที่ 3

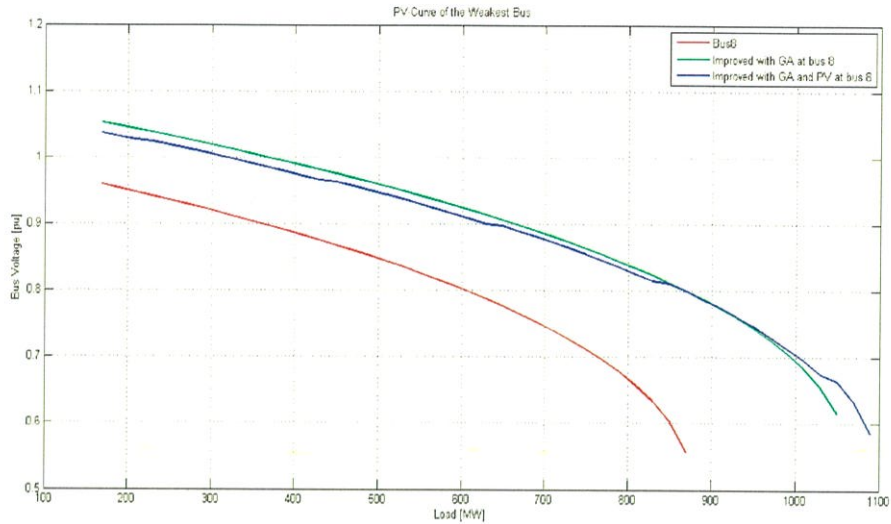
ทดสอบกับระบบจำลอง IEEE 30 bus, IEEE 57 bus และ Thailand 124 bus โดยติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณ 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของโหลดรวมเข้าที่หลายบัส โดยให้กระบวนการขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมคำนวณหาปริมาณการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ของแต่ละบัส รูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วย PV Curve ของบัสที่อ่อนแอที่สุด



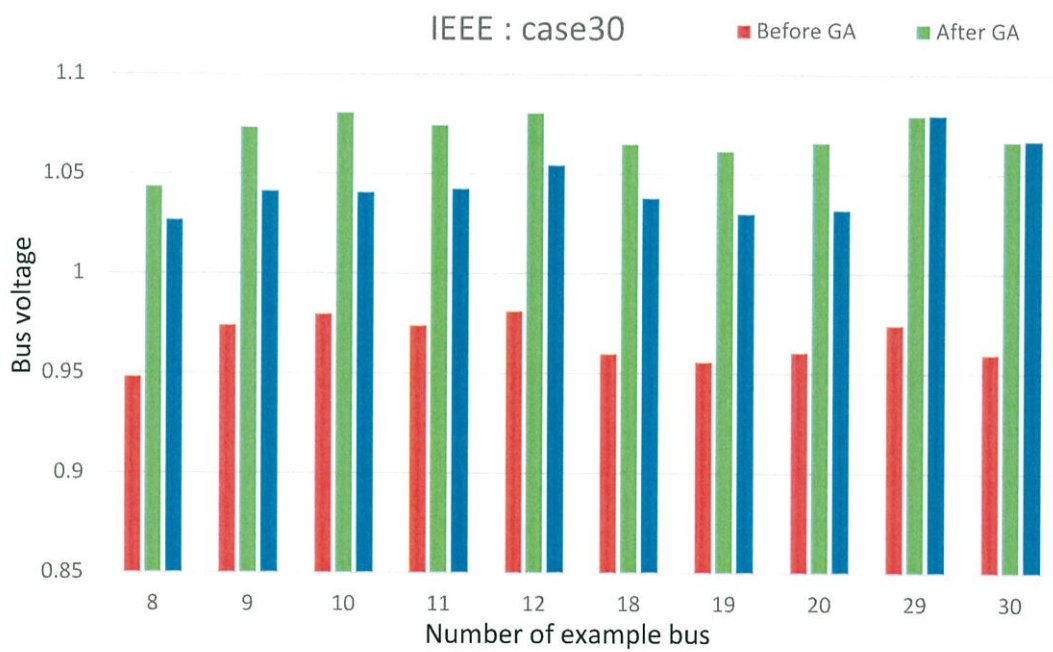
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เมอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 30 bus



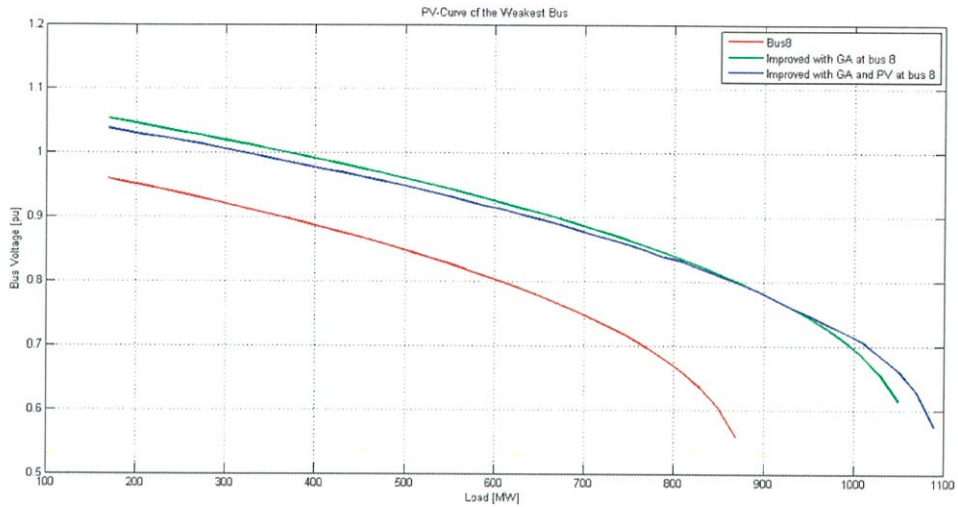
รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เมอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 30 bus



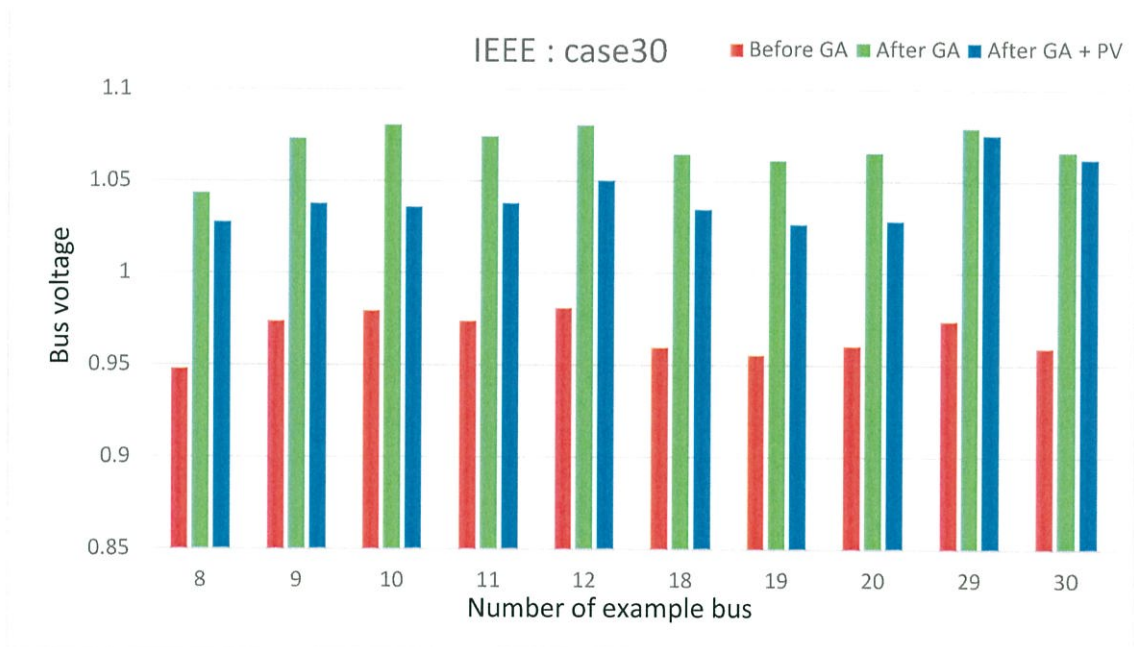
รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 30 bus



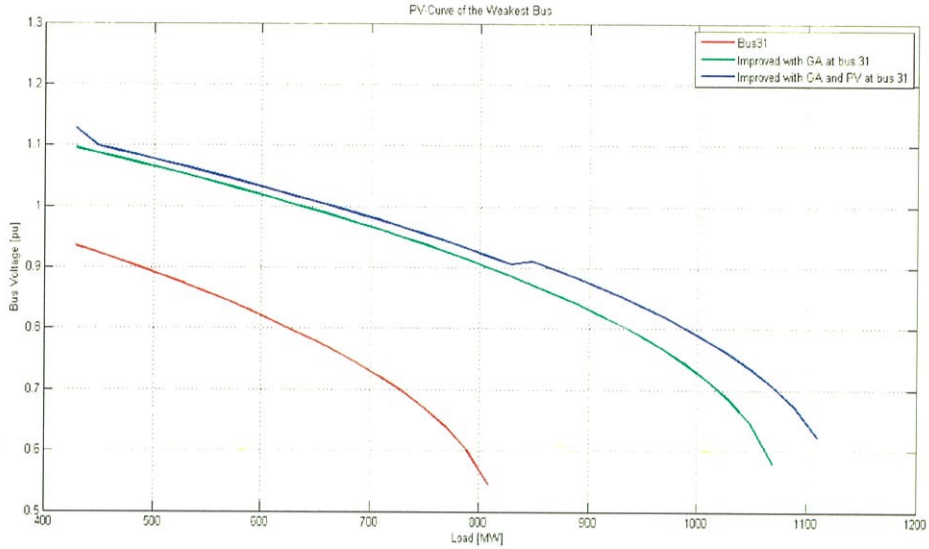
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 30 bus



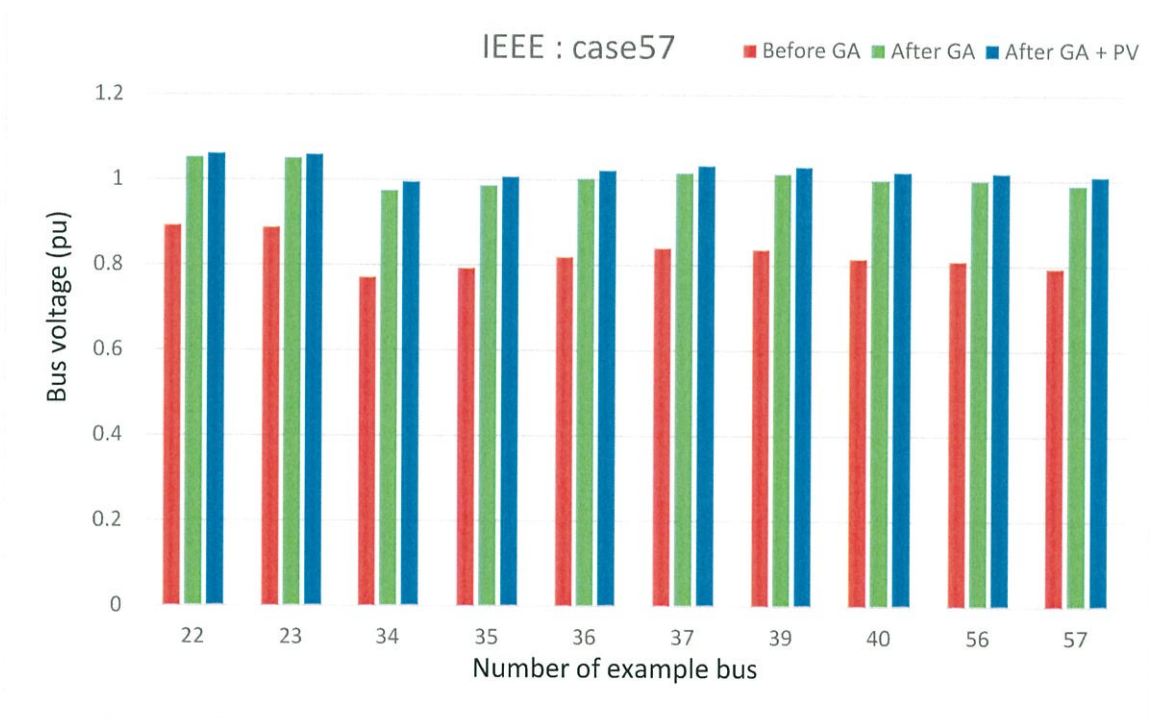
รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 30 bus



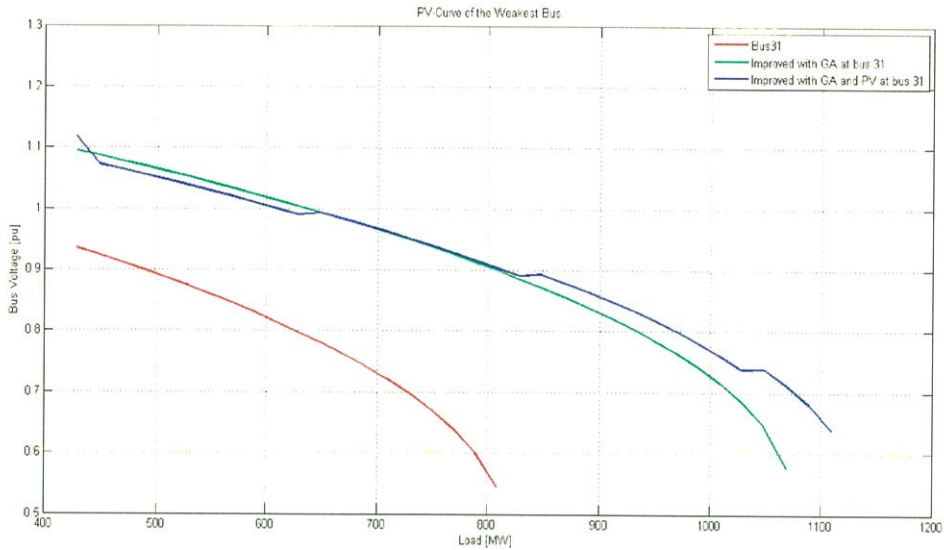
รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 20 บัส ของ IEEE 30 bus



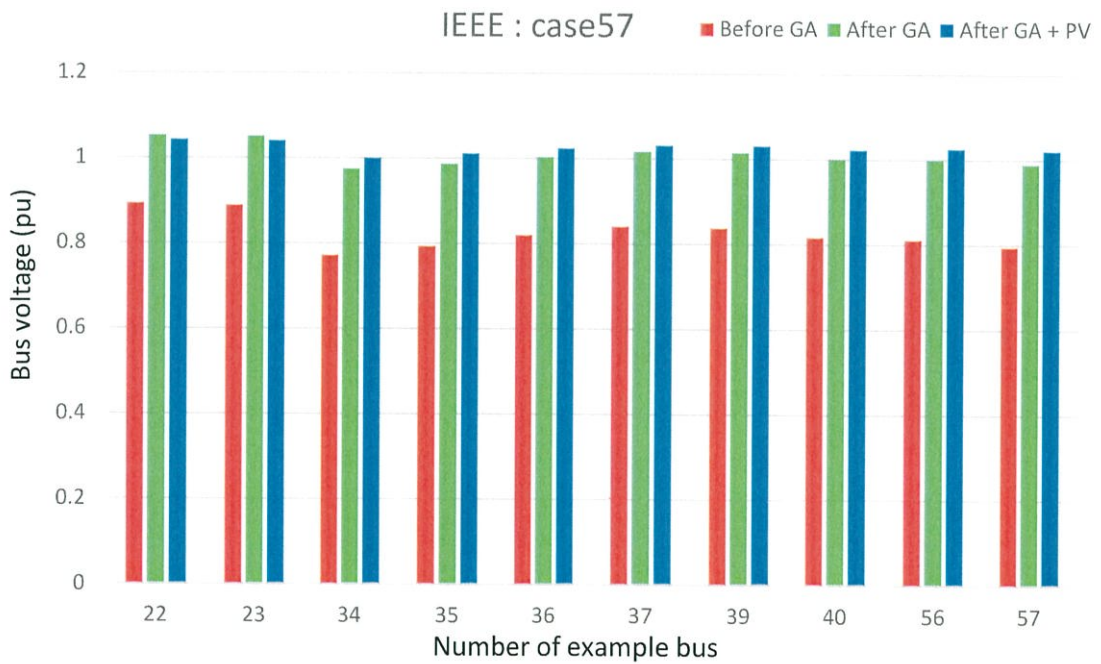
รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus



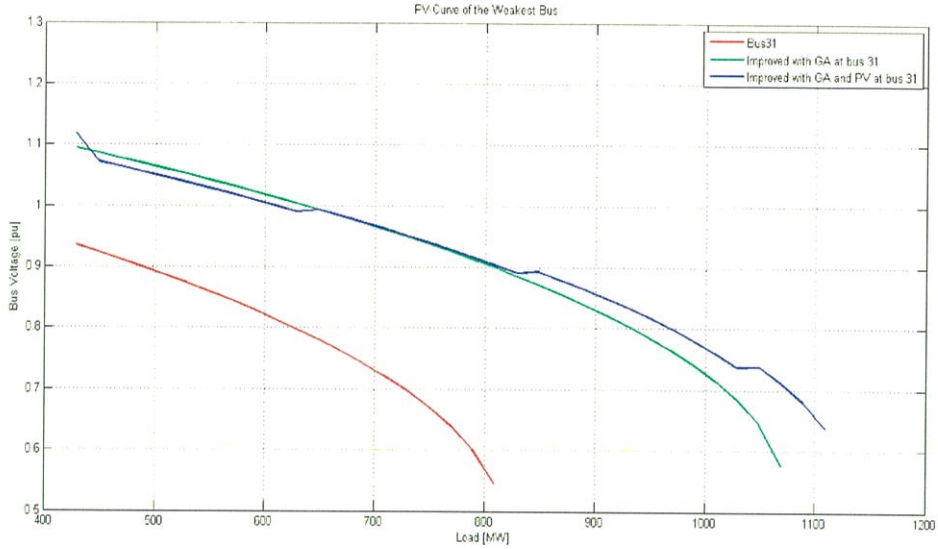
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus



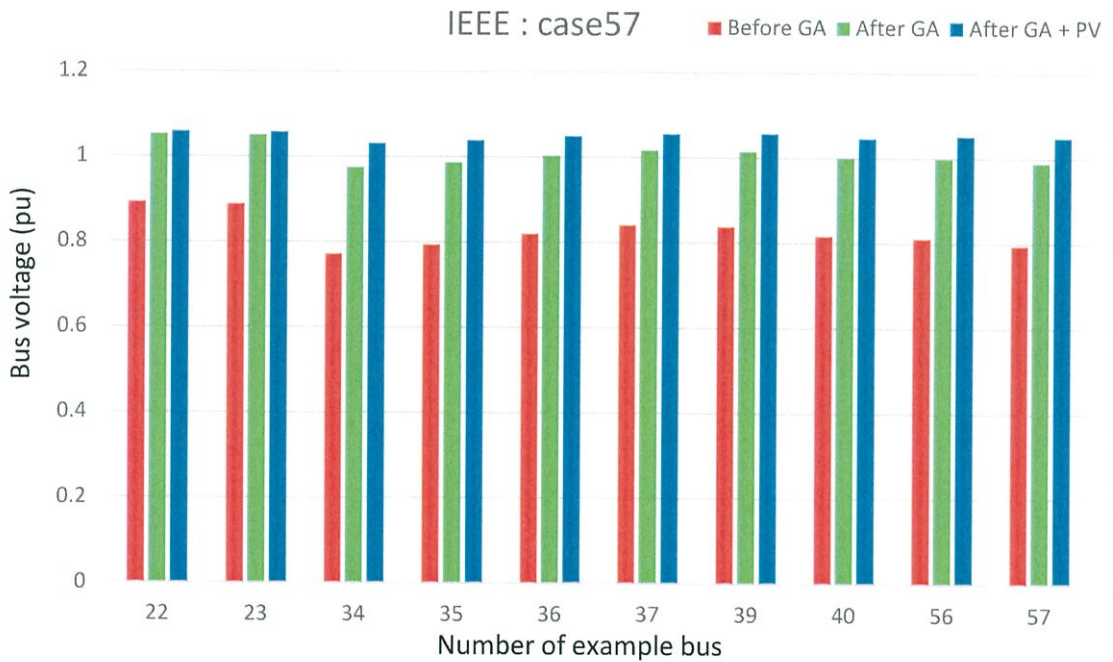
รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เมอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus



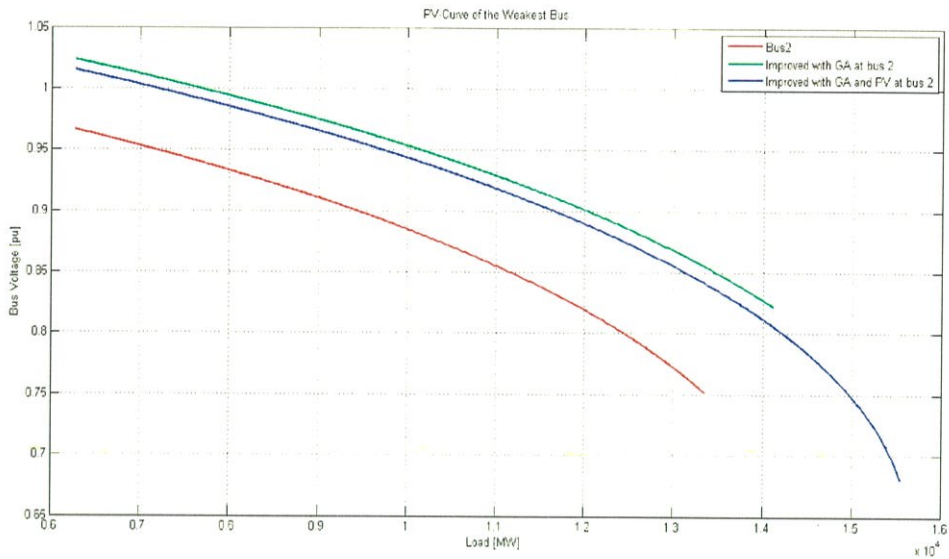
รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เมอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus



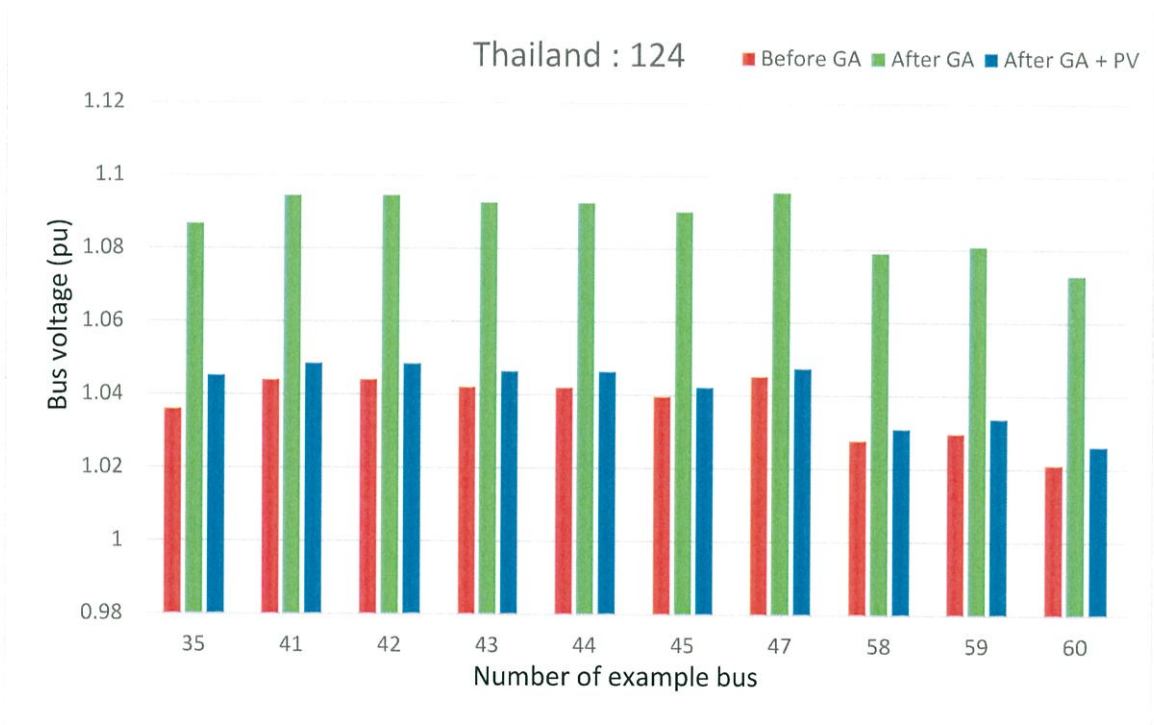
รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus



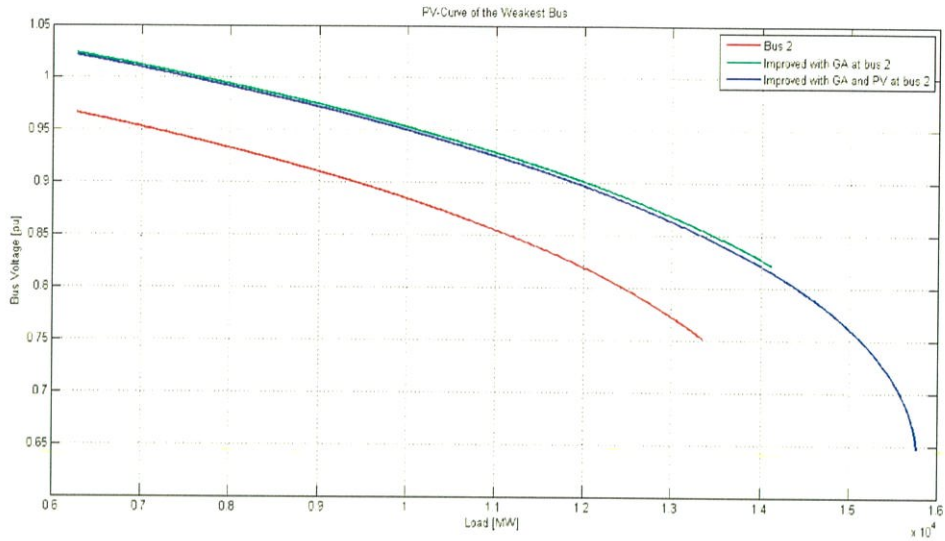
รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ IEEE 57 bus



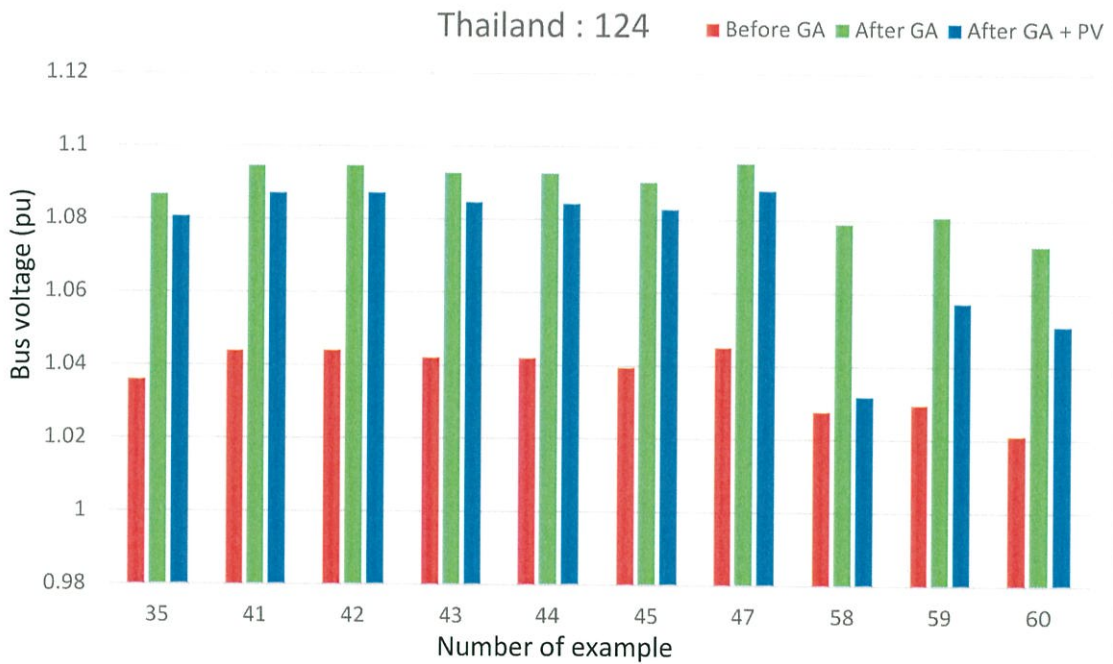
รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus



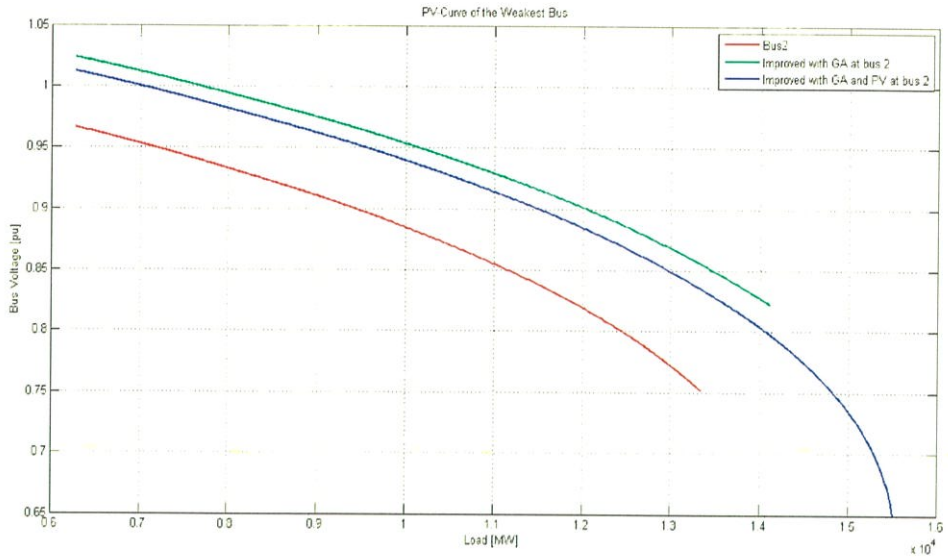
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 5 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus



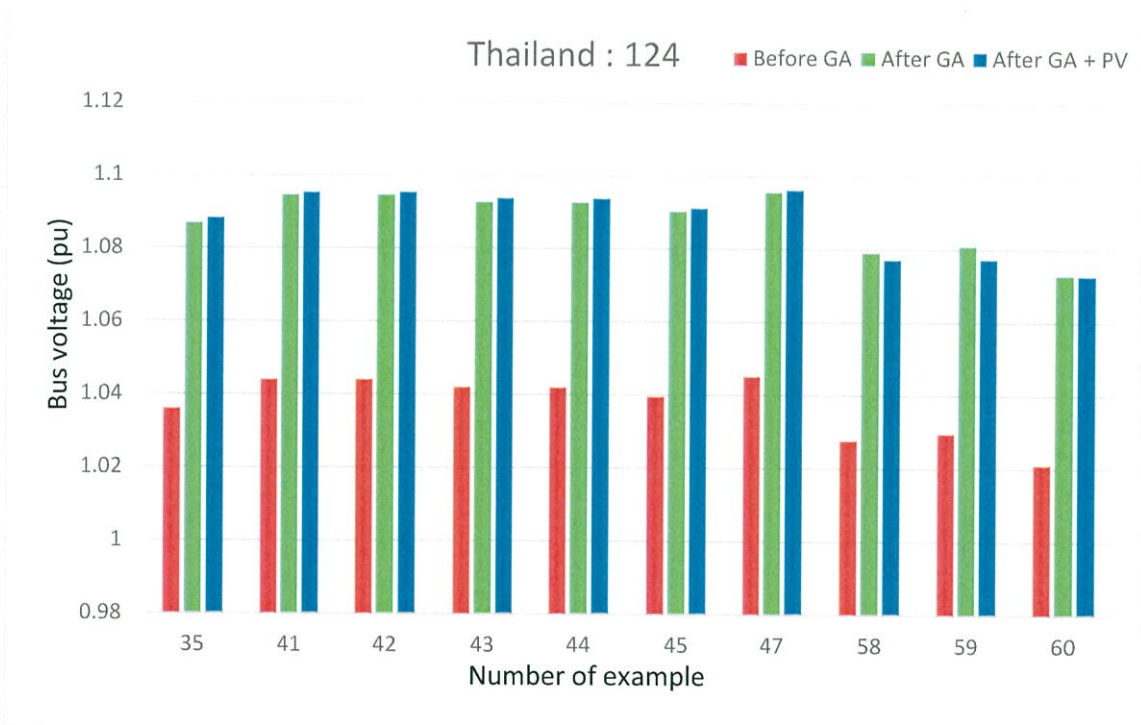
รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 10 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus



รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus



รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 20 เปอร์เซ็นต์กระจายเข้าที่บัสตัวอย่างจำนวน 10 บัส ของ Thailand 124 bus

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบ Load margin ของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบที่หลายบัส ของ IEEE 30 bus, IEEE 57 bus และ Thailand case 124

Case	Load margin (MW) and relative improvements (%)				
	Before GA	After GA	After GA with Solar PV		
			5%	10%	20%
IEEE:30	700	880 (+25.71%)	880 (+25.71%)	920 (+31.43%)	920 (+31.43%)
IEEE:57	380	640 (+68.42%)	680 (+78.95%)	680 (+78.95%)	740 (+94.74%)
Thailand:124	7080	7840 (+10.73%)	9280 (+31.07%)	9500 (+34.18%)	9240 (+30.51%)

จากการทดลองที่ 3 เมื่อทำการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่หลายตำแหน่งของ IEEE 30 bus, IEEE 57 bus และ Thailand case 124 และคำนวณ PV Curve พบว่าการติดตั้งด้วยลักษณะนี้จะเพิ่มความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดของระบบไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 จากตารางที่ 4.2 พบว่าระบบ IEEE 30 bus สามารถเพิ่ม Load margin ได้สูงสุดถึง 31.43 เปอร์เซ็นต์ ระบบ IEEE 57 bus สามารถเพิ่ม Load margin ได้สูงสุดถึง 94.74 เปอร์เซ็นต์ ระบบ Thailand 124 bus สามารถเพิ่ม Load margin ได้สูงสุดถึง 34.18 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากแผนพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้า พ.ศ.2558-2579 (PDP 2015) (ฉบับร่าง) ที่เน้นการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น และมีโครงการที่จะเชื่อมโยงโครงข่ายระบบสายส่งไฟฟ้าภายในภูมิภาคอาเซียน ซึ่งหากประเทศไทยจะเพิ่มการใช้พลังงานทดแทนประเภทพลังงานแสงอาทิตย์ย่อมมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังอย่างแน่นอน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นและปรับปรุงแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นได้

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) โดยใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังจำลอง IEEE 9 bus, IEEE 30 bus, IEEE 57 bus และ Thailand 124 bus

ในส่วนแรก เริ่มจากการออกแบบโปรแกรมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในการคำนวณ PV Curve และกระบวนการขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ที่มีตัวบ่งชี้แอล (L - indicator) เป็นดัชนีชี้วัดค่าเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบเพื่อใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ระบบ ในส่วนที่สองเป็นการทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการทดสอบระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมรวมถึงการติดตั้งตัวเก็บประจุชดเชยค่าประกอบกำลังไฟฟ้า และสัดส่วนปริมาณการผลิตไฟฟ้าของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ให้เชื่อมต่อกับระบบทดสอบผ่านกระบวนการขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม จากผลการทดลองที่ 2 พบว่าการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการหาบัสที่เหมาะสมที่สุดบัสเดียวสามารถเพิ่มความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามหากติดตั้งในแบบการทดลองที่ 3 ที่เป็นการติดตั้งโดยการกระจายสัดส่วนของกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าที่หลายบัสจะเพิ่มความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มเติมสูงสุดมีค่ามากกว่าผลที่ได้ในการทดลองที่ 2

จากการศึกษาพบว่า หากติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในตำแหน่งที่ผิด อาจส่งผลกระทบต่อระบบ แต่อย่างไรก็ตามโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้สามารถหาตำแหน่งที่ถูกต้องและเหมาะสมในการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ซึ่งจะนำไปสู่เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบที่สูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมเป็นแบบจำลองอย่างง่าย
2. สามารถปรับปรุงการทำงานของโปรแกรมให้มีความละเอียดในการคำนวณให้มากขึ้น
3. การใช้ตัวบ่งชี้แอลอาจทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณของกระบวนการขั้นตอนเชิงวิธีพันธุกรรมได้ เนื่องจากค่าตัวบ่งชี้แอลเป็นค่าในการประมาณเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้าเท่านั้น
4. ตัวโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปพัฒนาร่วมกับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมโดยใช้ค่าความเข้มแสงของแสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.Pichalai, *Thailand's Power Development Plan 2015*, a seminar presentation by director general of energy policy and planning office, Ministry of Energy, Thailand.
- [2] J.Duncan Glover, Mulukuta S.Sarma, Thomas J.Overbye, *Power system analysis and design*, 5th Ed., Cengage Learning, 2012.
- [3] Wang Yi - Bo, "Steady- state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system," *Industrial Technology*, 2008, pp. 1-6
- [4] M.A Arjona and Manuel Carrillo, *MATLAB for Engineers – Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics*, 1st Ed., Intech, 2011.
- [5] P. Kessel & H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System," *IEEE Trans. Power Delivery.*, Vol. 1, No.3, 1986, pp. 346-353
- [6] D. Devaraj, J. Preetha Roselyn, "Genetic algorithm based reactive power dispatch for voltage stability improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010, pp.1151-1156

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความวิชาการ

Improving Voltage Stability of Grid-connected PV Power System with Genetic Algorithm

Prawee Nitayotan, Phuridej Wasoontharatham, Pitch Atthawan and Supakit Prasitporn

Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung 1 Alley Ladkrabang Bangkok 10520 Tel. 02-3290-8000 ext.3925 Email : man.prawee@gmail.com

Abstract

In this project, we develop a computer software for enhancing voltage stability of grid-connected photovoltaic (PV) power systems by using genetic algorithm (GA). The program can find optimal locations for solar panel installation, compute optimal generation levels for the PV systems, and also analyze the impact on power system voltage stability. Our GA-based optimization scheme employs the computation of L-indicator, which is an index for approximating power system voltage stability level, and a 2-part Newton algorithm for finding power flow solutions of grid-connected photovoltaic power systems. The program has been tested on several IEEE systems, and a Thailand's high voltage transmission test system, which is constructed based on the generation, transmission and distribution data of Thailand power grid. The numerical results show that it can reliably compute optimal solutions that significantly improve the voltage stability of grid-connected PV power systems.

1. Introduction

The demand for electricity is steadily increasing along with human population growth, which leads to the necessity to maintain the stability of power grid. This project utilizes genetic algorithm (GA) in order to improve voltage stability of power systems by finding the optimal values of controlling variables (i.e. voltage magnitudes at PV buses, number of shunt capacitors, and solar power generation outputs). GA is a search heuristic that imitates the process of natural selection. It has the ability to evolve random populations of variables to an optimal set of values via a procedure similar to natural evolution that includes selections (for eliminating bad populations), crossovers (for creating next generations) and mutations (for adding variations to the population). Based on GA, our main goal is to develop a software that computes the best optimal solutions, regarding voltage stability, for large-scale power systems incorporating solar PV generations.[1]

2. Methodology

1. PV-curve computation is a tool for analyzing voltage stability. Increasing loads can cause a voltage collapse at the critical point (critical voltage)

2. L-indicator computation is a method aimed for online detections of voltage instability. The L-indicator is a quantitative measure for the estimation of the actual state distance of the systems to the stability limit.[2]

3. Two-part Newton for grid-connected PV power systems is the computation between the equation sets of PV-systems and power systems to determine valid operating points.[3]

4. Genetic Algorithm (GA) is the algorithm that imitates the evolution of living creatures and a kind of Artificial Intelligent (AI), that can evolve itself to approach an optimal answer . It has the following process, building the first generation, selection, crossover and mutation.[1]

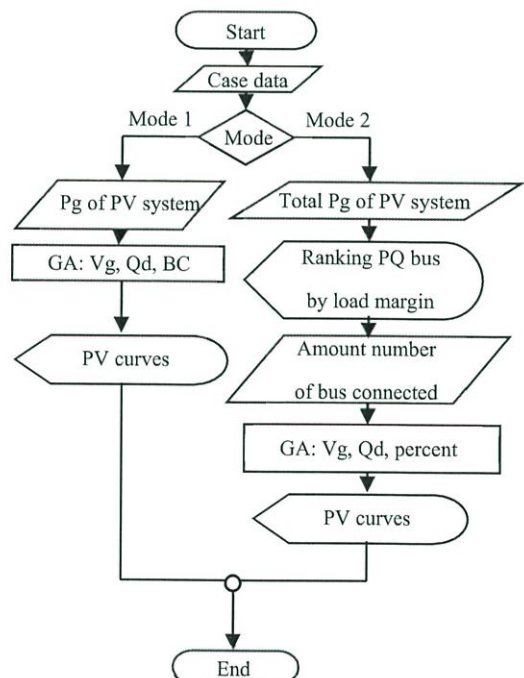


Fig. 1 Flow chart of GA procedure

3. Result

The project experiments are divided into 2 modes. The first mode is finding one optimal bus for PV –connection. The second mode is for determining the optimal PV generations at the specified multiple locations.

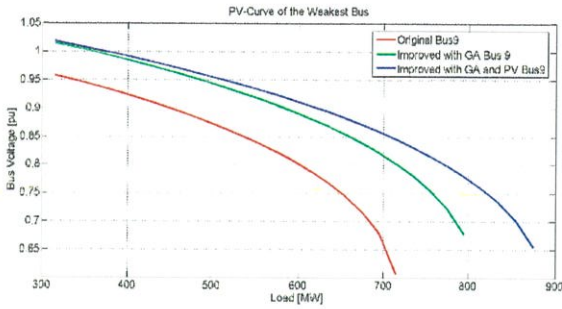


Fig. 2 PV-curve of case 9 (mode 1 at 10% PV generation)

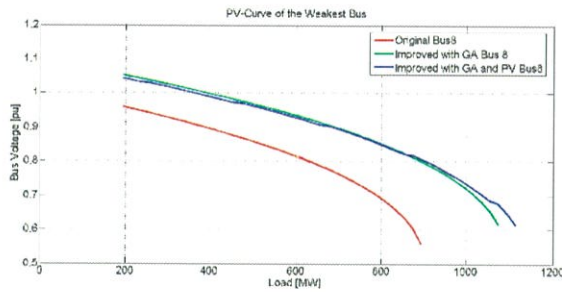


Fig. 3 PV-curve of case 30 (mode 2 at 10% PV generation)

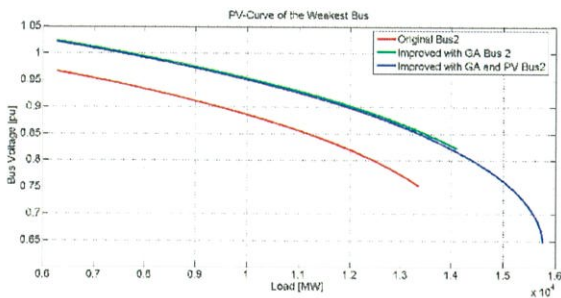


Fig. 2 PV-curve of case Thailand
(mode 2 at 10% PV generation)

Table 1 Loadmargin improvement

Case	Load margin (MW) and relative improvements (%)				
	Before GA	After GA	After GA with Solar PV		
			5%	10%	20%
IEEE:9	400	480	520	560	640
IEEE:30	700	880	880	920	920
IEEE:57	380	640	680	680	740
TH:124	7080	7840	9280	9500	9240

4. Conclusion

We have successfully developed a software to improve voltage stability of power systems by using GA. We are able to improve load margins of power systems by adjusting bus voltages, reactive power inputs and installing solar power generation systems at certain buses. The simulation results show that installing solar panels at the right buses will improve voltage stability of power systems. On the other hand, negative effects will occur if solar panels are installed at the wrong locations. The program we developed has the ability to find optimal values for power system parameters including voltages, reactive power and generation power of solar panels. In addition to that, it can find the optimal locations for installing solar panels as well. Through an extensive testing and evaluation on several test systems, the program can consistently find correct optimal solutions, which correspond to operation settings that can significantly improve the voltage stability of grid-connected PV power systems.

5. References

[1] D. Devaraj, J. Preetha Roselyn, "Genetic algorithm based reactive power dispatch for voltage stability improvement," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, pp.1151-1156

[2] P. Kessel& H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System," IEEE Trans. Power Delivery., Vol. 1, No.3, 1986, pp. 346-3

[3] Wang Yi - Bo, "Steady- state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system," Industrial Technology, 2008, pp. 1-6



Mr.Prawee Nitayotan
Surawittayakarn School



Mr.Pitch Atthawan
Satee Siriket School



Mr.Phuridej Wasoontharatharm
Phuket Wittayalai School



Mr.Supakit Prasitporn
Mathayomwatsing School

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

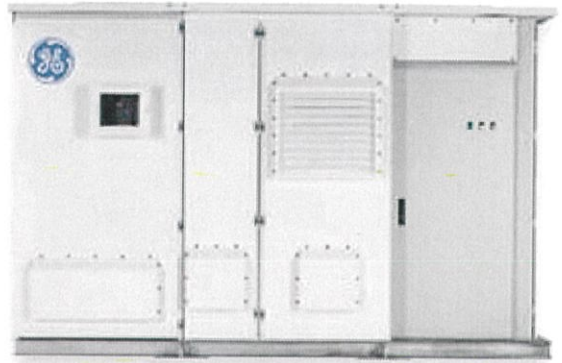
GE's solar inverter also comes enabled with several grid friendly features that have been developed with the expertise of GE's Controls Center of Excellence.

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.

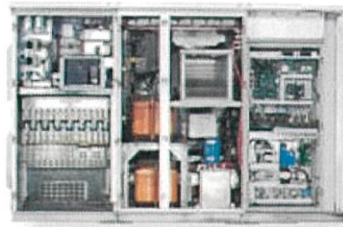


fact sheet

Technical Specifications

Output Power	Nominal AC Power Nominal AC Voltage Nominal AC Line Current Nominal Grid Frequency Nominal Power Factor	1,000 kWAC 480 Vac (+10/-5%) 1,204 Aac 50 Hz 0.99 or greater	1,000 kWAC 480 Vac (+10/-5%) 1,204 Aac 60 Hz 0.99 or greater
Efficiency	Peak Conversion Efficiency (without transformer) Weighted Efficiency (without transformer) Night Time Consumption	> 98.0* > 97.5%† (EuroETA) < 250 W	> 97.5%* > 97.0%† (CEC) < 250 W
Input Power	Input Voltage Max MPP Voltage Range MPP DC Current Max Isc	1,000 Vdc 450-850 Vdc 2,400 Adc 3,600 Adc	1,000 Vdc 450-850 Vdc 2,400 Adc 3,600 Adc
Dimensions	Height Width Depth Weight	2,350 mm 3,400 mm 1,300 mm 4,000 kg	2,350 mm 3,400 mm 1,300 mm 4,000 kg
Environmental Design	Outdoor Enclosure Operating Temperature	NEMA 3R (NEMA 3S Bridge and Controls) -30.0 to 50.0 °C	NEMA 3R (NEMA 3S Bridge and Controls) -30.0 to 50.0 °C
Certifications and Standards		CE	UL 508C 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.

GE413801107010

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.

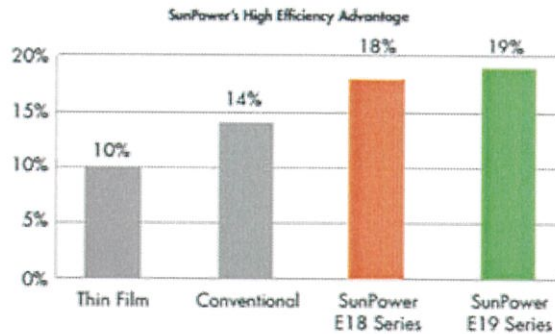


SPR-240E-WHT-D



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

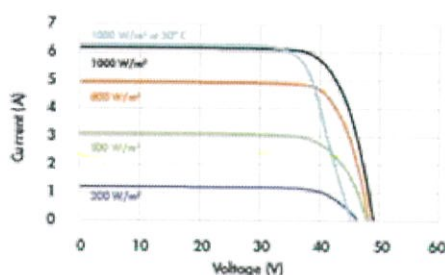
Measured at Standard Test Conditions (STC) irradiance of 1000W/m², AM 1.5, and cell temperature 25° C

Peak Power (+5/-3%)	P_{max}	240 W
Efficiency	η	19.3 %
Rated Voltage	V_{mp}	40.5 V
Rated Current	I_{mp}	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 antireflective (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

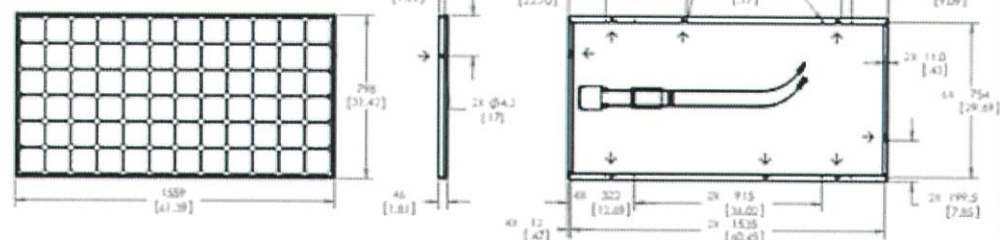
Temperature	-40° F to +185° F [-40° C to +85° C]
Max load	113 psf 550kg/m ² (5400 Pa) front - e.g. snow; 50 psf 245kg/m ² (2400 Pa) front and back - e.g. wind
Impact Resistance	Hail 1 in (25 mm) at 52mph (23 m/s)

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 Hole

Max
[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 #001-03217 Rev-11 / 04_2011

ภาคผนวก ค

ข้อมูลรายละเอียดในระบบไฟฟ้ากำลัง

1. ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 9 Bus

ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตาราง ค.1 ข้อมูลแต่ละบัส

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชั้นตัสเซปแดนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (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 ค.2 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 9 Bus

หมายเลขบัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (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 ค.3 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 9 Bus

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชัสเซปแทนซ์	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 IEEE 30 Bus

ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตาราง ค.4 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 30 Bus

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับซัสเซปแดนซ์(Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Slack Bus	0	0	1	0	0	135	1.05	0.95
2	Generator	21.7	12.7	1	0	0	135	1.1	0.95
3	Load Bus	2.4	1.2	1	0	0	135	1.05	0.95
4	Load Bus	7.6	1.6	1	0	0	135	1.05	0.95
5	Load Bus	0	0	1	0	0.19	135	1.05	0.95
6	Load Bus	0	0	1	0	0	135	1.05	0.95
7	Load Bus	22.8	10.9	1	0	0	135	1.05	0.95

ตาราง ค.4 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 30 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		แรงดันบัส		ชนิดข้อผิดพลาด แดนซ์(Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
8	Load Bus	30	30	1	0	0	135	1.05	0.95
9	Load Bus	0	0	1	0	0	135	1.05	0.95
10	Load Bus	5.8	2	1	0	0	135	1.05	0.95
11	Load Bus	5	0	1	0	0	135	1.05	0.95
12	Load Bus	11.2	7.5	1	0	0	135	1.05	0.95
13	Generator	0	0	1	0	0	135	1.1	0.95
14	Load Bus	6.2	1.6	1	0	0	135	1.05	0.95
15	Load Bus	8.2	2.5	1	0	0	135	1.05	0.95

ตาราง ค.4 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 30 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชนิดขั้วสาย แดนซ์(Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
16	Load Bus	3.5	1.8	1	0	0	135	1.05	0.95
17	Load Bus	9	5.8	1	0	0	135	1.05	0.95
18	Load Bus	3.2	0.9	1	0	0	135	1.05	0.95
19	Load Bus	9.5	3.4	1	0	0	135	1.05	0.95
20	Load Bus	2.2	0.7	1	0	0	135	1.05	0.95
21	Load Bus	17.5	11.2	1	0	0	135	1.05	0.95
22	Generator	0	0	1	0	0	135	1.1	0.95
23	Generator	3.2	1.6	1	0	0	135	1.1	0.95

ตาราง ค.4 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 30 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชั้นตัสเซปเตนซ์(Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส ฮ)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
24	Load Bus	8.7	6.7	1	0	0.04	135	1.05	0.95
25	Load Bus	0	0	1	0	0	135	1.05	0.95
26	Load Bus	3.5	2.3	1	0	0	135	1.05	0.95
27	Generator	0	0	1	0	0	135	1.1	0.95
28	Load Bus	0	0	1	0	0	135	1.05	0.95
29	Load Bus	2.4	0.9	1	0	0	135	1.05	0.95
30	Load Bus	10.6	1.9	1	0	0	135	1.05	0.95

ตาราง ค.5 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 30 Bus

หมายเลขบัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
1	23.54	0	80	0	150	-20	1
2	60.97	0	80	0	60	-20	1
22	21.59	0	50	0	62.5	-15	1
27	26.91	0	55	0	48.7	-15	1
23	19.2	0	30	0	40	-10	1
13	37	0	40	0	44.7	-15	1

ตาราง ค.6 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแทนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
1	1	2	0.02	0.06	0.03	1
2	1	3	0.05	0.19	0.02	1
3	2	4	0.06	0.17	0.02	1
4	3	4	0.01	0.04	0	1
5	2	5	0.05	0.2	0.02	1
6	2	6	0.06	0.18	0.02	1
7	4	6	0.01	0.04	0	1
8	5	7	0.05	0.12	0.01	1
9	6	7	0.03	0.08	0.01	1
10	6	8	0.01	0.04	0	1
11	6	9	0	0.21	0	1
12	6	10	0	0.56	0	1
13	9	11	0	0.21	0	1
14	9	10	0	0.11	0	1
15	4	12	0	0.26	0	1
16	12	13	0	0.14	0	1
17	12	14	0.12	0.26	0	1
18	12	15	0.07	0.13	0	1
19	12	16	0.09	0.2	0	1
20	14	15	0.22	0.2	0	1
21	16	17	0.08	0.19	0	1

ตาราง ค.6 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus (ต่อ)

ลำดับสาย ส่ง	บัสต้นทาง	บัส ปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซป แดนซ์	การตั้งค่า แทป (p.u.)
			ความ ต้านทาน	รีแอก แตนซ์		
22	15	18	0.11	0.22	0	1
23	18	19	0.06	0.13	0	1
24	19	20	0.03	0.07	0	1
25	10	20	0.09	0.21	0	1
26	10	17	0.03	0.08	0	1
27	10	21	0.03	0.07	0	1
28	10	22	0.07	0.15	0	1
29	21	22	0.01	0.02	0	1
30	15	23	0.1	0.2	0	1
31	22	24	0.12	0.18	0	1
32	23	24	0.13	0.27	0	1
33	24	25	0.19	0.33	0	1
34	25	26	0.25	0.38	0	1
35	25	27	0.11	0.21	0	1
36	28	27	0	0.4	0	1
37	27	29	0.22	0.42	0	1
38	27	30	0.32	0.6	0	1
39	29	30	0.24	0.45	0	1
40	8	28	0.06	0.2	0.02	1
41	6	28	0.02	0.06	0.01	1

3. ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus

ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตาราง ค.7 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 57 Bus

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซปแทนซ์(Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Slack Bus	55	17	1.04	0	0	0	1.06	0.94
2	Generator	3	88	1.01	-1.18	0	0	1.06	0.94
3	Generator	41	21	0.985	-5.97	0	0	1.06	0.94
4	Load Bus	0	0	0.981	-7.32	0	0	1.06	0.94
5	Load Bus	13	4	0.976	-8.52	0	0	1.06	0.94
6	Generator	75	2	0.98	-8.65	0	0	1.06	0.94
7	Load Bus	0	0	0.984	-7.58	0	0	1.06	0.94
8	Generator	150	22	1.005	-4.45	0	0	1.06	0.94
9	Generator	121	26	0.98	-9.56	0	0	1.06	0.94

ตาราง ค.7 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 57 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้น เซปเตนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน(MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
10	Load Bus	5	2	0.986	-11.43	0	0	1.06	0.94
11	Load Bus	0	0	0.974	-10.17	0	0	1.06	0.94
12	Generator	377	24	1.015	-10.46	0	0	1.06	0.94
13	Load Bus	18	2.3	0.979	-9.79	0	0	1.06	0.94
14	Load Bus	10.5	5.3	0.97	-9.33	0	0	1.06	0.94
15	Load Bus	22	5	0.988	-7.18	0	0	1.06	0.94
16	Load Bus	43	3	1.013	-8.85	0	0	1.06	0.94
17	Load Bus	42	8	1.017	-5.39	0	0	1.06	0.94

ตาราง ค.7 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 57 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซปแทนซ์(Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
18	Load Bus	27.2	9.8	1.001	-11.71	10	0	1.06	0.94
19	Load Bus	3.3	0.6	0.97	-13.2	0	0	1.06	0.94
20	Load Bus	2.3	1	0.964	-13.41	0	0	1.06	0.94
21	Load Bus	0	0	1.008	-12.89	0	0	1.06	0.94
22	Load Bus	0	0	1.01	-12.84	0	0	1.06	0.94
23	Load Bus	6.3	2.1	1.008	-12.91	0	0	1.06	0.94
24	Load Bus	0	0	0.999	-13.25	0	0	1.06	0.94
25	Load Bus	6.3	3.2	0.982	-18.13	5.9	0	1.06	0.94
26	Load Bus	0	0	0.959	-12.95	0	0	1.06	0.94
27	Load Bus	9.3	0.5	0.982	-11.48	0	0	1.06	0.94
28	Load Bus	4.6	2.3	0.997	-10.45	0	0	1.06	0.94

ตาราง ค.7 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 57 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์(Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u)
29	Load Bus	17	2.6	1.01	-9.75	0	0	1.06	0.94
30	Load Bus	3.6	1.8	0.962	-18.68	0	0	1.06	0.94
31	Load Bus	5.8	2.9	0.936	-19.34	0	0	1.06	0.94
32	Load Bus	1.6	0.8	0.949	-18.46	0	0	1.06	0.94
33	Load Bus	3.8	1.9	0.947	-18.5	0	0	1.06	0.94
34	Load Bus	0	0	0.959	-14.1	0	0	1.06	0.94
35	Load Bus	6	3	0.966	-13.86	0	0	1.06	0.94
36	Load Bus	0	0	0.976	-13.59	0	0	1.06	0.94
37	Load Bus	0	0	0.985	-13.41	0	0	1.06	0.94
38	Load Bus	14	7	1.013	-12.71	0	0	1.06	0.94
39	Load Bus	0	0	0.983	-13.46	0	0	1.06	0.94

ตาราง ค.7 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 57 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั๊ตเซป แดนซ์(Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u)
40	Load Bus	0	0	0.973	-13.62	0	0	1.06	0.94
41	Load Bus	6.3	3	0.996	-14.05	0	0	1.06	0.94
42	Load Bus	7.1	4.4	0.966	-15.5	0	0	1.06	0.94
43	Load Bus	2	1	1.01	-11.33	0	0	1.06	0.94
44	Load Bus	12	1.8	1.017	-11.86	0	0	1.06	0.94
45	Load Bus	0	0	1.036	-9.25	0	0	1.06	0.94
46	Load Bus	0	0	1.05	-11.89	0	0	1.06	0.94
47	Load Bus	29.7	11.6	1.033	-12.49	0	0	1.06	0.94
48	Load Bus	0	0	1.027	-12.59	0	0	1.06	0.94
49	Load Bus	18	8.5	1.036	-12.92	0	0	1.06	0.94

ตาราง ค.7 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE 57 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์(Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u)
50	Load Bus	21	10.5	1.023	-13.39	0	0	1.06	0.94
51	Load Bus	18	5.3	1.052	-12.52	0	0	1.06	0.94
52	Load Bus	4.9	2.2	0.98	-11.47	0	0	1.06	0.94
53	Load Bus	20	10	0.971	-12.23	6.3	0	1.06	0.94
54	Load Bus	4.1	1.4	0.996	-11.69	0	0	1.06	0.94
55	Load Bus	6.8	3.4	1.031	-10.78	0	0	1.06	0.94
56	Load Bus	7.6	2.2	0.968	-16.04	0	0	1.06	0.94
57	Load Bus	6.7	2	0.965	-16.56	0	0	1.06	0.94

ตาราง ค.8 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 57 Bus

หมายเลขบัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
1	128.9	-16.1	575.88	0	200	-140	1.04
2	0	-0.8	100	0	50	-17	1.01
3	40	-1	140	0	60	-10	0.985
6	0	0.8	100	0	25	-8	0.98
8	450	62.1	550	0	200	-140	1.005
9	0	2.2	100	0	9	-3	0.98
12	310	128.5	410	0	155	-150	1.015

ตาราง ค.9 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus

ลำดับสาย ส่ง	บัสต้นทาง	บัส ปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซป แดนซ์	การตั้งค่า แทป (p.u.)
			ความ ต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
1	1	2	0.02	0.06	0.03	1
2	1	3	0.05	0.19	0.02	1
3	2	4	0.06	0.17	0.02	1
4	3	4	0.01	0.04	0	1
5	2	5	0.05	0.2	0.02	1
6	2	6	0.06	0.18	0.02	1
7	4	6	0.01	0.04	0	1
8	5	7	0.05	0.12	0.01	1
9	6	7	0.03	0.08	0.01	1
10	6	8	0.01	0.04	0	1
11	6	9	0	0.21	0	1
12	6	10	0	0.56	0	1
13	9	11	0	0.21	0	1
14	9	10	0	0.11	0	1
15	4	12	0	0.26	0	1
16	12	13	0	0.14	0	1
17	12	14	0.12	0.26	0	1
18	12	15	0.07	0.13	0	1
19	12	16	0.09	0.2	0	1
20	14	15	0.22	0.2	0	1
21	16	17	0.08	0.19	0	1
22	15	18	0.11	0.22	0	1
23	18	19	0.06	0.13	0	1

ตาราง ค.9 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
24	19	20	0.03	0.07	0	1
25	10	20	0.09	0.21	0	1
26	10	17	0.03	0.08	0	1
27	10	21	0.03	0.07	0	1
28	10	22	0.07	0.15	0	1
29	21	22	0.01	0.02	0	1
30	15	23	0.1	0.2	0	1
31	22	24	0.12	0.18	0	1
32	23	24	0.13	0.27	0	1
33	24	25	0.19	0.33	0	1
34	25	26	0.25	0.38	0	1
35	25	27	0.11	0.21	0	1
36	28	27	0	0.4	0	1
37	27	29	0.22	0.42	0	1
38	27	30	0.32	0.6	0	1
39	29	30	0.24	0.45	0	1
40	8	28	0.06	0.2	0.02	1
41	6	28	0.02	0.06	0.01	1
42	8	28	0.06	0.2	0.02	1
43	6	28	0.02	0.06	0.01	1

4. ระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus

ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชั้นตัสเซปแทนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Slack Bus	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
2	Load Bus	463.0199	115.754975	1	0	0	230	1.1	0.9
3	Load Bus	273.0054	68.25135	1	0	0	230	1.1	0.9
4	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
5	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
6	Load Bus	160.4396	40.1099	1	0	0	230	1.1	0.9
7	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
8	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
9	Load Bus	175.3359	43.833975	1	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
10	Load Bus	57.9239	14.480975	1	0	0	230	1.1	0.9
11	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
12	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
13	Load Bus	50.8842	12.72105	1	0	0	230	1.1	0.9
14	Load Bus	402.8865	100.721625	1	0	0	230	1.1	0.9
15	Load Bus	151.8609	37.965225	1	0	0	230	1.1	0.9
16	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
17	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
18	Load Bus	79.375	19.84375	1	0	0	230	1.1	0.9
19	Load Bus	336.5881	84.147025	1	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั๊สเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
20	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
21	Load Bus	277.6433	69.410825	1	0	0	230	1.1	0.9
22	Load Bus	132.502	33.1255	1	0	0	230	1.1	0.9
23	Load Bus	28.2707	7.067675	1	0	0	230	1.1	0.9
24	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
25	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
26	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
27	Load Bus	244.3155	61.078875	1	0	0	230	1.1	0.9
28	Load Bus	81.814	20.4535	1	0	0	230	1.1	0.9
29	Load Bus	684.8569	171.214225	1	0	0	230	1.1	0.9
30	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้สเซป แทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
31	Load Bus	226.9727	56.743175	1	0	0	230	1.1	0.9
32	Load Bus	704.1322	176.03305	1	0	0	230	1.1	0.9
33	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
34	Load Bus	277.5364	69.3841	1	0	0	230	1.1	0.9
35	Load Bus	677.9643	169.491075	1	0	0	230	1.1	0.9
36	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
37	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
38	Load Bus	629.8949	157.473725	1	0	0	230	1.1	0.9
39	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
40	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
41	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
42	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
43	Load Bus	399.2039	99.800975	1	0	0	230	1.1	0.9
44	Load Bus	399.2039	99.800975	1	0	0	230	1.1	0.9
45	Load Bus	980.0464	245.0116	1	0	0	230	1.1	0.9
46	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
47	Load Bus	492.644	123.161	1	0	0	230	1.1	0.9
48	Load Bus	845.3317	211.332925	1	0	0	230	1.1	0.9
49	Load Bus	492.644	123.161	1	0	0	230	1.1	0.9
50	Load Bus	492.644	123.161	1	0	0	230	1.1	0.9
51	Load Bus	492.644	123.161	1	0	0	230	1.1	0.9
52	Load Bus	492.644	123.161	1	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้สเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
53	Load Bus	492.644	123.161	1	0	0	230	1.1	0.9
54	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
55	Load Bus	492.644	123.161	1	0	0	230	1.1	0.9
56	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
57	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
58	Load Bus	1073.8314	268.45785	1	0	0	230	1.1	0.9
59	Load Bus	903.37	225.8425	1	0	0	230	1.1	0.9
60	Load Bus	306.6467	76.661675	1	0	0	230	1.1	0.9
61	Load Bus	401.3789	100.344725	1	0	0	230	1.1	0.9
62	Load Bus	747.6959	186.923975	1	0	0	230	1.1	0.9
63	Load Bus	523.1057	130.776425	1	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้สเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
64	Load Bus	346.317	86.57925	1	0	0	230	1.1	0.9
65	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
66	Load Bus	181.7818	45.44545	1	0	0	230	1.1	0.9
67	Load Bus	291.0315	72.757875	1	0	0	230	1.1	0.9
68	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
69	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
70	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
71	Load Bus	84.1401	21.035025	1	0	0	230	1.1	0.9
72	Load Bus	84.1401	21.035025	1	0	0	230	1.1	0.9
73	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
74	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
75	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
76	Load Bus	292.6917	73.172925	1	0	0	230	1.1	0.9
77	Load Bus	172.671	43.16775	1	0	0	230	1.1	0.9
78	Load Bus	492.4553	123.113825	1	0	0	230	1.1	0.9
79	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
80	Load Bus	463.4348	115.8587	1	0	0	230	1.1	0.9
81	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
82	Load Bus	122.0126	30.50315	1	0	0	230	1.1	0.9
83	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
84	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
85	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
86	Load Bus	85.117	21.27925	1	0	0	230	1.1	0.9
87	Load Bus	40.383	10.09575	1	0	0	230	1.1	0.9
88	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
89	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
90	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
91	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
92	Generator	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
93	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
94	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
95	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
96	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
97	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
98	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
99	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
100	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
101	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
102	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
103	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
104	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
105	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
106	Load Bus	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
107	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับชั้สเซป แดนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
108	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
109	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
110	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
111	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
112	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
113	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
114	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
115	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
116	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
117	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
118	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9

ตาราง ค.10 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		แรงดันบัส		ระดับชั้นเซป แทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้า จริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
119	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
120	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
121	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
122	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
123	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9
124	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9

ตาราง ค.11 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 Bus

หมายเลขบัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
1	2610.75	0	0	0	1305.38	-1305.38	1.05
4	1635	0	0	0	817.5	-817.5	1.05
5	375	0	0	0	187.5	-187.5	1.05
7	736.5	0	0	0	368.25	-368.25	1.05
8	112.5	0	0	0	56.25	-56.25	1.05
11	584.4	0	0	0	292.2	-292.2	1.05
17	0.9	0	0	0	0.45	-0.45	1.05
20	551.4	0	0	0	275.7	-275.7	1.05
24	375	0	0	0	187.5	-187.5	1.05

ตาราง ค.11 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
25	711	0	0	0	355.5	-355.5	1.05
26	121.5	0	0	0	60.75	-60.75	1.05
30	376.875	0	0	0	188.44	-188.44	1.05
36	1432.5	0	0	0	716.25	-716.25	1.05
39	540	0	0	0	270	-270	1.05
40	22.5	0	0	0	11.25	-11.25	1.05
46	502.5	0	0	0	251.25	-251.25	1.05
54	1191	0	0	0	595.5	-595.5	1.05
65	858.7425	0	0	0	429.37	-429.37	1.05

ตาราง ค.11 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
68	525	0	0	0	262.5	-262.5	1.05
69	1050	0	0	0	525	-525	1.05
70	14.25	0	0	0	7.13	-7.13	1.05
73	183	0	0	0	91.5	-91.5	1.05
74	561.15	0	0	0	280.58	-280.58	1.05
75	180	0	0	0	90	-90	1.05
79	236.25	0	0	0	118.13	-118.13	1.05
81	1107	0	0	0	553.5	-553.5	1.05
83	225	0	0	0	112.5	-112.5	1.05
84	534.75	0	0	0	267.38	-267.38	1.05

ตาราง ค.11 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	กำลังผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้า เสมือน (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	
88	262.5	0	0	0	131.25	-131.25	1.05
91	1009.875	0	0	0	504.94	-504.94	1.05
92	225	0	0	0	112.5	-112.5	1.05

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีรีส์เซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
1	1	37	0.003	0.00576	0	1
2	1	37	0.003	0.00576	0	1
3	1	66	0.00024	0.00182	0	1
4	1	66	0.00024	0.00182	0	1
5	1	67	0.00354	0.02724	0	1
6	1	67	0.00354	0.02724	0	1
7	2	3	0.01512	0.11622	0.00222	1
8	2	3	0.01512	0.11622	0.00222	1
9	3	4	0	0.25202	0	1
10	3	4	0	0.25202	0	1
11	3	6	0.01748	0.13438	0.00222	1
12	3	6	0.01748	0.13438	0.00222	1
13	3	8	0.01536	0.11804	0.00222	1
14	3	8	0.01536	0.11804	0.00222	1
15	4	5	0.02788	0.21428	0.00222	1
16	4	5	0.02788	0.21428	0.00222	1
17	4	12	0.026	0.04995	0.0105	1
18	4	12	0.026	0.04995	0.0105	1
19	4	12	0.026	0.04995	0.0105	1
20	7	8	0.01087	0.08353	0.00222	1
21	7	8	0.01087	0.08353	0.00222	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
22	8	9	0.01512	0.11622	0.00222	1
23	8	9	0.01512	0.11622	0.00222	1
24	8	14	0.00945	0.07264	0.00222	1
25	8	14	0.00945	0.07264	0.00222	1
26	9	10	0.01512	0.11622	0.00222	1
27	9	10	0.01512	0.11622	0.00222	1
28	9	11	0.02032	0.15617	0.00222	1
29	9	11	0.02032	0.15617	0.00222	1
30	9	13	0.00425	0.03269	0	1
31	9	13	0.00425	0.03269	0	1
32	9	33	0	0.25202	0	1
33	9	34	0	0.25202	0	1
34	9	34	0.01772	0.1362	0.00222	1
35	10	11	0.01772	0.1362	0.00222	1
36	10	11	0.00402	0.03087	0	1
37	12	13	0.00402	0.03087	0	1
38	12	13	0.00047	0.00363	0	1
39	12	36	0.00047	0.00363	0	1
40	12	36	0.0146	0.02805	0.0105	1
41	12	36	0.0146	0.02805	0.0105	1
42	13	31	0.0146	0.02805	0.0105	1
43	13	31	0.01323	0.10169	0.00222	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสาย ส่ง	บัสต้นทาง	บัส ปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซัสเซป แตนซ์	การตั้งค่า แทป (p.u.)
			ความ ต้านทาน	รีแอก แตนซ์		
44	13	33	0.01323	0.10169	0.00222	1
45	13	33	0.01536	0.11804	0.00222	1
46	13	34	0.01536	0.11804	0.00222	1
47	14	15	0.01725	0.13257	0.00222	1
48	14	15	0.01725	0.13257	0.00222	1
49	14	16	0.02079	0.15981	0.00222	1
50	14	16	0.02079	0.15981	0.00222	1
51	14	17	0.01772	0.1362	0.00222	1
52	14	17	0.01772	0.1362	0.00222	1
53	14	28	0.02575	0.19794	0.00222	1
54	14	28	0.02575	0.19794	0.00222	1
55	15	16	0.00756	0.05811	0	1
56	15	16	0.00756	0.05811	0	1
57	15	17	0.00449	0.0345	0	1
58	15	17	0.00449	0.0345	0	1
59	15	18	0.00071	0.00545	0	1
60	15	18	0.00071	0.00545	0	1
61	15	19	0.00473	0.03632	0	1
62	15	19	0.00473	0.03632	0	1
63	15	21	0.0163	0.1253	0.00222	1
64	15	21	0.0163	0.1253	0.00222	1
65	15	28	0.00921	0.07082	0.00222	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
66	15	28	0.00921	0.07082	0.00222	1
67	16	17	0.00307	0.02361	0	1
68	16	17	0.00307	0.02361	0	1
69	16	28	0.01465	0.11259	0.00222	1
70	16	28	0.01465	0.11259	0.00222	1
71	17	28	0.01063	0.08172	0.00222	1
72	17	28	0.01063	0.08172	0.00222	1
73	19	20	0.00709	0.05448	0	1
74	19	20	0.00709	0.05448	0	1
75	21	22	0.01418	0.10896	0.00222	1
76	21	27	0.01418	0.10896	0.00222	1
77	21	93	0.00331	0.02542	0	1
78	21	93	0.00331	0.02542	0	1
79	22	23	0.00331	0.02542	0	1
80	22	23	0.00331	0.02542	0	1
81	22	24	0.0052	0.03995	0	1
82	22	24	0.0052	0.03995	0	1
83	23	24	0.0026	0.01998	0	1
84	23	24	0.0026	0.01998	0	1
85	25	93	0.0104	0.01998	0.0105	1
86	25	93	0.0104	0.01998	0.0105	1
87	26	27	0.01418	0.10896	0.00222	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
88	26	27	0.01418	0.10896	0.00222	1
89	28	29	0.00945	0.07264	0.00222	1
90	28	29	0.00945	0.07264	0.00222	1
91	28	93	0.018	0.03458	0.0105	1
92	28	93	0.018	0.03458	0.0105	1
93	29	30	0.00662	0.05085	0	1
94	29	30	0.00662	0.05085	0	1
95	29	32	0.00827	0.06356	0.00222	1
96	29	32	0.00827	0.06356	0.00222	1
97	30	31	0.00662	0.05085	0	1
98	30	31	0.00662	0.05085	0	1
99	30	32	0.00732	0.0563	0	1
100	30	32	0.00732	0.0563	0	1
101	31	34	0.00756	0.05811	0	1
102	31	34	0.00756	0.05811	0	1
103	32	36	0.00874	0.06719	0.00222	1
104	32	36	0.00874	0.06719	0.00222	1
105	33	35	0.00236	0.01816	0	1
106	33	35	0.00236	0.01816	0	1
107	34	42	0.00331	0.02542	0	1
108	34	42	0.00331	0.02542	0	1
109	35	36	0.01252	0.09625	0.00222	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
110	35	36	0.01252	0.09625	0.00222	1
111	35	43	0.00189	0.01453	0	1
112	35	43	0.00189	0.01453	0	1
113	36	37	0.016	0.03074	0.0105	1
114	36	41	0.0082	0.01575	0.0105	1
115	36	41	0.0082	0.01575	0.0105	1
116	36	41	0.0082	0.01575	0.0105	1
117	36	42	0.01181	0.0908	0.00222	1
118	36	42	0.01181	0.0908	0.00222	1
119	36	57	0.0146	0.02805	0.0105	1
120	36	57	0.0146	0.02805	0.0105	1
121	36	57	0.0146	0.02805	0.0105	1
122	36	89	0.0108	0.02075	0.0105	1
123	36	89	0.0108	0.02075	0.0105	1
124	37	85	0.02717	0.20884	0.00222	1
125	37	85	0.02717	0.20884	0.00222	1
126	38	39	0.00419	0.03223	0	1
127	38	39	0.00419	0.03223	0	1
128	38	39	0.00419	0.03223	0	1
129	38	39	0.00419	0.03223	0	1
130	38	42	0.00697	0.05357	0	1
131	38	42	0.00697	0.05357	0	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชั้สเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
132	38	69	0.00898	0.06901	0	1
133	38	69	0.00898	0.06901	0	1
134	39	40	0.0104	0.0799	0.00222	1
135	39	40	0.0104	0.0799	0.00222	1
136	41	42	1.01E-05	7.76E-05	0	1
137	41	42	1E-05	7.76E-05	0	1
138	42	43	0.00038	0.00072	0	1
139	42	43	0.00038	0.00072	0	1
140	42	47	0.00039	0.00076	0	1
141	42	47	0.00039	0.00076	0	1
142	43	44	9E-05	0.00017	0	1
143	43	44	8.98E-05	0.00017	0	1
144	43	56	0.00048	0.00369	0	1
145	43	56	0.00048	0.00369	0	1
146	44	45	0.00018	0.00136	0	1
147	44	46	0.00025	0.0019	0	1
148	45	49	0.00011	0.00085	0	1
149	45	49	0.00011	0.00085	0	1
150	46	47	0.00031	0.00241	0	1
151	46	47	0.00031	0.00241	0	1
152	47	48	0.00024	0.00182	0	1
153	47	55	0.00018	0.0014	0	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชั้สเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
154	47	55	0.00018	0.0014	0	1
155	48	55	0.00036	0.00276	0	1
156	49	50	0.00011	0.00085	0	1
157	49	50	0.00011	0.00085	0	1
158	50	51	0.00011	0.00085	0	1
159	50	51	0.00011	0.00085	0	1
160	50	51	0.00011	0.00085	0	1
161	50	51	0.00011	0.00085	0	1
162	51	52	0.00019	0.00148	0	1
163	51	52	0.00019	0.00148	0	1
164	51	56	0.00021	0.00159	0	1
165	51	56	0.00021	0.00159	0	1
166	51	59	0.00177	0.0136	0	1
167	51	59	0.00177	0.0136	0	1
168	52	53	0.00013	0.00097	0	1
169	52	53	0.00013	0.00097	0	1
170	53	54	0.00019	0.00148	0	1
171	53	54	0.00019	0.00148	0	1
172	54	55	0.00023	0.00175	0	1
173	54	55	0.00023	0.00175	0	1
174	54	55	0.00023	0.00175	0	1
175	56	57	1.01E-05	7.76E-05	0	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชั้สเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
176	56	57	1E-05	7.76E-05	0	1
177	56	59	0.00408	0.03134	0	1
178	56	59	0.00408	0.03134	0	1
179	58	59	0.00142	0.0109	0	1
180	58	59	0.00142	0.0109	0	1
181	58	88	0.00413	0.03178	0	1
182	58	88	0.00413	0.03178	0	1
183	59	60	0.00437	0.0336	0	1
184	59	60	0.00437	0.0336	0	1
185	59	61	0.00874	0.06719	0	1
186	59	61	0.00874	0.06719	0	1
187	61	62	0.00142	0.0109	0	1
188	61	62	0.00142	0.0109	0	1
189	61	64	0.00307	0.02361	0	1
190	61	64	0.00307	0.02361	0	1
191	61	92	0.00307	0.02361	0	1
192	61	92	0.00307	0.02361	0	1
193	62	64	0.00189	0.01453	0	1
194	62	64	0.00189	0.01453	0	1
195	62	84	0.00236	0.01816	0	1
196	62	84	0.00236	0.01816	0	1
197	63	64	0.00024	0.00182	0	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
198	63	64	0.00024	0.00182	0	1
199	63	89	0.00071	0.00545	0	1
200	63	89	0.00071	0.00545	0	1
201	63	90	0.00473	0.03632	0	1
202	63	90	0.00473	0.03632	0	1
203	64	65	0.00047	0.00363	0	1
204	64	65	0.00047	0.00363	0	1
205	64	90	0.00354	0.02724	0	1
206	64	90	0.00354	0.02724	0	1
207	66	67	0.00118	0.00908	0	1
208	66	67	0.00118	0.00908	0	1
209	67	69	0.00142	0.0109	0	1
210	67	69	0.00142	0.0109	0	1
211	68	69	0.00118	0.00908	0	1
212	68	69	0.00118	0.00908	0	1
213	69	70	0.00992	0.07627	0.00222	1
214	69	70	0.00992	0.07627	0.00222	1
215	70	71	0.00803	0.06174	0.00222	1
216	70	71	0.00803	0.06174	0.00222	1
217	71	72	0.00933	0.07173	0.00222	1
218	71	72	0.00933	0.07173	0.00222	1
219	72	73	0.02505	0.19249	0.00222	1
220	72	73	0.02505	0.19249	0.00222	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
221	73	74	0.00121	0.00926	0	1
222	73	74	0.00121	0.00926	0	1
223	73	75	0.00402	0.03087	0	1
224	73	75	0.00402	0.03087	0	1
225	73	78	0.00638	0.04903	0	1
226	73	78	0.00638	0.04903	0	1
227	74	76	0.00071	0.00545	0	1
228	74	76	0.00071	0.00545	0	1
229	76	77	0.00591	0.0454	0	1
230	76	77	0.00591	0.0454	0	1
231	77	80	0.00945	0.07264	0.00222	1
232	77	80	0.00945	0.07264	0.00222	1
233	78	79	0.00591	0.0454	0	1
234	78	79	0.00591	0.0454	0	1
235	78	94	0.01961	0.15073	0.00222	1
236	78	94	0.01961	0.15073	0.00222	1
237	80	81	0.00945	0.07264	0.00222	1
238	80	81	0.00945	0.07264	0.00222	1
239	81	94	0.00236	0.01816	0	1
240	81	94	0.00236	0.01816	0	1
241	82	94	0.00969	0.07445	0.00222	1
242	82	94	0.00969	0.07445	0.00222	1
243	72	73	0.02505	0.19249	0.00222	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
244	83	94	0.00354	0.02724	0	1
245	85	86	0.0086	0.01652	0.0105	1
246	85	86	0.0086	0.01652	0.0105	1
247	86	87	0.006	0.01153	0	1
248	86	87	0.006	0.01153	0	1
249	89	90	0	0.25202	0	1
250	89	90	0	0.25202	0	1
251	89	91	0.0046	0.00884	0	1
252	89	91	0.0046	0.00884	0	1
253	2	95	0	0.25202	0	1
254	8	96	0	0.25202	0	1
255	11	97	0	0.25202	0	1
256	14	98	0	0.25202	0	1
257	18	99	0	0.25202	0	1
258	20	100	0	0.25202	0	1
259	21	101	0	0.25202	0	1
260	22	102	0	0.25202	0	1
261	23	103	0	0.25202	0	1
262	27	104	0	0.25202	0	1
263	29	105	0	0.25202	0	1
264	31	106	0	0.25202	0	1
265	32	107	0	0.25202	0	1
266	32	109	0	0.25202	0	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
267	33	108	0	0.25202	0	1
268	35	110	0	0.25202	0	1
269	48	111	0	0.25202	0	1
270	66	112	0	0.25202	0	1
271	69	113	0	0.25202	0	1
272	70	114	0	0.25202	0	1
273	71	115	0	0.25202	0	1
274	72	116	0	0.25202	0	1
275	73	117	0	0.25202	0	1
276	75	118	0	0.25202	0	1
277	79	119	0	0.25202	0	1
278	80	120	0	0.25202	0	1
279	81	121	0	0.25202	0	1
280	82	122	0	0.25202	0	1
281	86	123	0	0.25202	0	1
282	87	124	0	0.25202	0	1
283	95	97	0.14999	0.69883	0.00056	1
284	96	97	0.08168	0.38055	0.00056	1
285	96	98	0.14108	0.65731	0.00056	1
286	99	101	0.09059	0.42206	0.00056	1
287	99	101	0.09059	0.42206	0.00056	1
288	99	105	0.09059	0.42206	0.00056	1
289	100	102	0.06237	0.2906	0.00056	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
290	100	102	0.06237	0.2906	0.00056	1
291	101	104	0.01931	0.08995	0	1
292	101	104	0.01931	0.08995	0	1
293	101	105	0.12623	0.58812	0.00056	1
294	103	104	0.17375	0.80953	0.00056	1
295	103	104	0.17375	0.80953	0.00056	1
296	105	107	0.00773	0.03604	0	1
297	105	107	0.00773	0.03604	0	1
298	105	108	0.02525	0.11762	0	1
299	105	108	0.02525	0.11762	0	1
300	106	107	0.1188	0.55353	0.00056	1
301	106	107	0.1188	0.55353	0.00056	1
302	106	108	0.05198	0.24217	0.00056	1
303	106	108	0.05198	0.24217	0.00056	1
304	109	110	0.04752	0.22141	0	1
305	109	110	0.04752	0.22141	0	1
306	110	112	0.0594	0.27676	0.00056	1
307	110	112	0.0594	0.27676	0.00056	1
308	113	115	0.0995	0.46358	0.00056	1
309	114	115	0.23018	1.07246	0.00056	1
310	115	116	0.10395	0.48434	0.00056	1
311	115	116	0.10395	0.48434	0.00056	1
312	118	119	0.1292	0.60196	0.00056	1

ตาราง ค.12 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแดนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
313	118	124	0.07425	0.34595	0.00056	1
314	118	124	0.07425	0.34595	0.00056	1
315	119	120	0.17226	0.80261	0.00056	1
316	120	121	0.05792	0.26984	0.00056	1
317	120	121	0.05792	0.26984	0.00056	1
318	121	122	0.05643	0.26292	0.00056	1
319	121	122	0.05643	0.26292	0.00056	1
320	123	124	0.04901	0.22833	0	1
321	123	124	0.04901	0.22833	0	1



ชื่อ: นาย ประวีร์ นิธิโยธาน

การศึกษา:โรงเรียนสุรวิทยาคาร

ที่อยู่: 373/1-3 ถเทศบาล.3 ต สุรินทร์.เมือง จ.โนเมือง อ.32000

man.prawee@gmail.com



ชื่อ: นาย พิชญ์ อรรณวัน

การศึกษา:โรงเรียนสตรีสิริเกศ

ที่อยู่: 1538/5 ถนน ศรีสุ่มังค์ ตำบล เมืองใต้ อำเภอ เมือง จังหวัด ศรีสะเกษ

33000 mcrcpitty24@gmail.com



ชื่อ: นาย ภูริเดช วสุนธราธรรม

การศึกษา:โรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัย

ที่อยู่: 31/10 หมู่ 1 ถนน เทพกระษัตริ ตำบล เกาะแก้ว อำเภอ เมืองภูเก็ต จังหวัด

ภูเก็ต 83000 w.phuridej@gmail.com



ชื่อ: นาย ศุภกฤต ประสิทธิ์พร

การศึกษา:โรงเรียนมัธยมวัดสิงห์

ที่อยู่: 22 ท่าข้ามซอย 4 แยก 11 ถนนพระราม 2 แขวงสามตำ เขตบางขุนเทียน

กรุงเทพ 10150 s.prasitporn@yahoo.com