

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าประเทศไทย
เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุด
OPTIMAL PLACEMENT OF DISTRIBUTED GENERATION
REGARDING VOLTAGE STABILITY FOR THAILAND POWER GRID



โดย

นายเทียนชัย

พาเทศ

นางสาวพิชชารีย์

อภิรักษ์นาคกร

นายวิศว

ตะพานวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าประเทศไทย
เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุด
OPTIMAL PLACEMENT OF DISTRIBUTED GENERATION
REGARDING VOLTAGE STABILITY FOR THAILAND POWER GRID



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMAL PLACEMENT OF DISTRIBUTED GENERATION
REGARDING VOLTAGE STABILITY FOR THAILAND POWER GRID



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าประเทศไทย
เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุด

OPTIMAL PLACEMENT OF DISTRIBUTED GENERATION
REGARDING VOLTAGE STABILITY FOR THAILAND POWER GRID



โดย

นายเทียนชัย

พาเทศ

นางสาวพิชชารีย์

อภิรัตน์ธนากร

นายวิศว

ตะพานวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. วรุตม์ สุอำพัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าประเทศไทย

เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุด

ผู้จัดทำ

1. นายเทียนชัย พาเทศ
2. นางสาวพิชชารีย์ อภินันท์ธนากร
3. นายวิศว ตะพานวงศ์




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.วรุฒม์ สุอำพัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าประเทศไทย เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิด ไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุด

นายเทียนชัย พาเทศ
นางสาวพิชชารีย์ อภินันท์ธนากร
นายวิศว ตะพานวงศ์
ดร. วรุตม์ สุอำพัน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์และการพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายด้วยขั้นตอนวิธีการคัตแยกหาคำตอบ โดยอาศัยข้อมูลการผลิตไฟฟ้า การส่งกำลังไฟฟ้า และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยในการระบุตำแหน่งบัสและปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย รวมทั้งทำการศึกษาผลกระทบเชิงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการติดตั้งด้วยโปรแกรมขั้นตอนการคัตแยกหาคำตอบที่พัฒนาขึ้น โดยวิธีแรกใช้ค่าความสามารถในการรองรับภาระทางไฟฟ้า (Load margin) ที่คำนวณได้จากกราฟของ P-V curve เป็นตัวชี้วัดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการของ Newton-Raphson และวิธีที่สองวิธีการหาค่าชี้วัด L (L-Index) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตำแหน่งและปริมาณการติดตั้งของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย นอกจากนี้ได้มีการใช้การคำนวณการไหลเวียนของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (OPF) เพื่อลดค่าใช้จ่ายของการดำเนินการอีกด้วย ผลการทดลองจากระบบจำลองสายส่งแรงสูงของประเทศไทยพบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายได้ และให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างแม่นยำ

Optimal Placement of Distributed Generation Regarding Voltage Stability for Thailand Power Grid

Thianchai	Phatet	
Pitcharee	Apinunthanakorn	
Wisawa	Taphanwong	
Dr. Warut	Suampun	Advisor

ABSTRACT

This project presents a numerical study and an optimization scheme for optimal placement of distributed generation system (DG) by using Separately-optimized method. Based on the generation, transmission and distribution data of Thailand power grid, we can determine an optimal location for distributed generation system installation, compute optimal generation levels for the DG units, and also analyze the impact on power system voltage stability. By using Newton-Raphson method to compute power flow's solutions of grid-connected DG power system, we can obtain voltage stability indices based on the Load margin values from P-V curves in the first experiment. L-indices are employed in the second experiment. In order to increase the computational speed and make our program suitable for online computing. Moreover, the optimal power flow calculation is added in the experiment three to further decrease the operation costs. The simulation results from IEEE test systems and Thailand power system show that our developed program can reliably and effectively improve the voltage stability of grid-connected DG power systems.

Keyword: Voltage stability, distributed generation system, Separately - optimized method.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าประเทศไทย เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุด สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร. วรุตม์ สุอำพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ และได้กรุณาตรวจแก้ไข จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น คณะผู้จัดทำรู้สึกปลาบปลื้มและซาบซึ้งถึงพระคุณ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้คอยอบรมสั่งสอน คอยดูแลเอาใจใส่และอบรมวิชาความรู้ ความเข้าใจในเนื้อหาของวิชาต่างๆที่ได้ศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันทำให้สามารถนำความรู้ต่างๆที่ได้จากคณาจารย์ทุกท่านมาประยุกต์พัฒนา และนำมาประกอบจัดทำเป็นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตคือ บิดา มารดาและครอบครัวที่ได้ดูแลเอาใจใส่ สนับสนุนด้านการศึกษาอย่างเต็มที่ตลอด คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 การคำนวณ Power Flow ด้วยวิธีการ Newton-Raphson Method	4
2.2.1 Power Flow Equation	4
2.2.2 วิธีการ Newton-Raphson Iteration	5
2.2.3 การประยุกต์ใช้ใน Power Flow Equation	6
2.3 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability)	8
2.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า	8
2.3.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าเสมือนต่อเสถียรภาพระดับแรงดันไฟฟ้า	9
2.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย (Distributed generation)	10
2.4.1 ตัวอย่างพลังงานไฟฟ้าแบบดั้งเดิม – แบบจำลองสถานีส่วนกลาง	10
2.4.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าเชิงกระจาย	11
2.5 วิธีการคัดแยกหาคำตอบ (Separately Optimize Method)	12
2.5.1 รูปแบบของปัญหา	13
2.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันด้วยวิธีการ L-Index	14
2.6.1 การคำนวณหาค่า L ในระบบไฟฟ้า	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 บัสในประเทศไทย	16
2.7.1 เพอร์ยูนิต (Per Unit)	16
2.7.2 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์	16
2.7.3. การหาอิมพีแดนซ์	17
2.7.4 ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า	17
2.7.5 การคำนวณกำลังการผลิต	18
2.7.6 การคำนวณโหลด	18
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	20
3.1 บทนำ	20
3.2 แผนผังขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม	22
3.2.1 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา PV Curve	22
3.2.2 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา L-Index	23
3.2.3 แผนผังของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เชิงกระจายที่บัสเดียว	24
3.2.4 แผนผังของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เชิงกระจายที่หลายบัส	25
3.3 การทดลอง	26
3.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการพัฒนาของระบบไฟฟ้ากำลัง	26
3.3.2 การทดลองที่ 1	26
3.3.3 การทดลองที่ 2	27
3.3.4 การทดลองที่ 3	28
3.3.5 การทดลองที่ 4	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
4.1 การทดลองที่ 1	30
4.1.1 การวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย	30
4.1.2 การวิเคราะห์หาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย	31
4.2 การทดลองที่ 2	33
4.2.1 การวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย	33
4.2.2 การวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 การเปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ แรงดัน PV Curve และ L-Index	37
4.3 การทดลองที่ 3	40
4.4 การทดลองที่ 4	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก เอกสารทางวิชาการ	56
ภาคผนวก ข ข้อมูลของระบบอ้างอิงต่างๆ	51
ประวัติผู้เขียน	114



สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 System One-line diagram	4
2.2 บัส 3	5
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (Load increment หรือ Load margin) กับ แรงดันไฟฟ้าที่บัส (Nodal voltage)	9
2.4 Classic Electricity Paradigm	11
2.5 Distributed Generation (DG) Electricity Paradigm	11
2.6 Wind Turbines at Buffalo Mountain, Tennessee	11
2.7 Solar Panels help Power this Elementary School in Fairbanks, Alaska	12
2.8 A 300 kW Capstone Micro-turbine at a Demonstration Project at the Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, Tennessee	11
2.9 แผนผังโปรแกรมของวิธีการคัดแยกค่าตอ	14
2.10 กราฟค่า L ของระบบอ้างอิง IEEE: Case 9	15
2.11 วงจรสมมูลของสายส่งแบบพาย	17
2.12 แผนที่สถานีไฟฟ้า(Bus) ณ สถานที่ต่างๆ ของประเทศไทย	19
3.1 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา PV Curve	22
3.2 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา L-Index	23
3.3 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่บัสเดียว	24
3.4 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่หลายบัส	25
4.1 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 9)	30
4.2 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 26)	30
4.3 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 31)	31
4.4 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 87)	31
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 9 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุด คือ 125 MW)	31

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 26 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุด คือ 0.875 MW)	32
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 31 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุด คือ 33.93 MW)	32
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 87 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุด คือ 68.651 MW)	32
4.9 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 9)	33
4.10 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 8)	34
4.11 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 31)	34
4.12 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 2)	34
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 9 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 181.25 MW)	35
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 8 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 48 MW)	35
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 31 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 26.97 MW)	36
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 2 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 625.076 MW)	36
4.17 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 9)	41
4.18 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 9 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 175 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	42
4.19 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 5)	42
4.20 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 5)	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 5 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 103.5 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	42
4.22 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 7)	43
4.23 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 8)	43
4.24 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 8 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 48 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	43
4.25 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 30)	44
4.26 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 30)	44
4.27 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 30 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดคือ 11.66 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	44
4.28 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 19)	44
4.29 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 19)	45
4.30 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 19 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 19.95 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	45
4.31 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 7)	45
4.32 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 31)	46
4.33 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 31 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 26.97 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	46
4.34 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 57)	46
4.35 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 57)	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 57 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 29.48 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	47
4.37 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 25)	47
4.38 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 25)	47
4.39 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 25 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 11.34 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	47
4.40 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 33)	48
4.41 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 2)	48
4.42 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 2 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 208.36 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	48
4.43 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 6)	49
4.44 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 6)	49
4.45 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 6 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 66.85 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	49
4.46 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 60)	49
4.47 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 60)	50
4.48 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 6 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 250.43 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ	50
4.49 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 2)	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แผนผังการดำเนินงาน	2
4.1 ตารางแสดงตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละระบบอ้างอิง ด้วยดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin	33
4.2 ตารางแสดงตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด ที่หาด้วยค่า L-Index	36
4.3 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด	37
4.4 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด	37
4.5 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด	38
4.6 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง Thailand 124 bus โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด	38
4.7 ตารางแสดงลำดับบัสที่เหมาะสมที่สุดต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของแต่ละระบบ	39
4.8 ตารางแสดงขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระบบ โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin	39
4.9 ตารางแสดงขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระบบ โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index	39
4.10 ตารางเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยดัชนีชี้วัด Load margin และ L-Index	40
4.11 ตารางการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งก่อนและหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ Load margin	40
4.12 ตารางการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งก่อนและหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ L-Index	41
4.13 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ IEEE: Case 9	43
4.14 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ IEEE: Case 30	45
4.15 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ IEEE: Case 57	48
4.16 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ Thailand 124 bus	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากข้อมูลของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย (Distributed Generator) จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) กังหันลม (Wind Turbine) เป็นต้น แต่ทว่า การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายในแต่ละพื้นที่นั้นมีผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน ทำให้ต้องมีการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเพื่อการออกแบบและติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายได้อย่างเหมาะสมที่สุด

ในการศึกษาและการจำลองระบบไฟฟ้า ได้มีการนำซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ MATLAB มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อแสดงถึงการไหลเวียนของกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัส (bus) รวมถึงความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าหลังจากเกิดเหตุการณ์รบกวน (contingencies) ต่อระบบ หากบัสใดที่ได้รับผลกระทบจากการรบกวนมากที่สุดก็จะเลือกติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่ตำแหน่งนั้น เพื่อเป็นการชดเชยภาระทางไฟฟ้าให้แก่บัสและช่วยในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและนำเสนอรูปแบบการวิเคราะห์ระบบกำลังไฟฟ้าภายในประเทศไทย เพื่อเป็นการเลือกติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายลงในระบบซึ่งช่วยในการชดเชยภาระทางไฟฟ้าแก่ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. กำหนดขอบเขตของโครงการ และศึกษาการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) โดยวิธีการใช้ Newton-Raphson power flow และ Separately-optimized method ในการหาคำตอบของระบบสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพทางแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง การล่มสลายทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง การจ่ายพลังงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายเพื่อชดเชยแรงดันและกำลังไฟฟ้า

2. ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB การใช้คำสั่งต่างๆ เพื่อใช้ในวิธีการหาเสถียรภาพทางแรงดันของระบบ

3. นำมาประยุกต์รวมเข้ากับการเขียนโปรแกรมของขั้นตอนวิธี Separately-optimized method เพื่อจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

4. มีการเพิ่มการใช้ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L (L-Index) จากเดิมที่ใช้ PV Curve เป็นค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันเพียงตัวเดียว เพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณ โดยในเบื้องต้นได้มีการนำ

คำตอบของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน และเช็คความใกล้เคียงของคำตอบ จากนั้นจึงใช้ L-Index ในกระบวนการ Separately-optimized method แทนการใช้ Load margin

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม MATLAB และกำหนดขอบเขตของงาน
2. รวบรวมข้อมูลการใช้ไฟฟ้าและสร้างเคสประเทศไทย
3. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและคัดแยกหาคำตอบด้วย MATLAB
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อให้รองรับการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายภายในเคสประเทศไทย
5. ตรวจสอบความถูกต้องและจัดทำปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 แผนผังการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
	59	59	59	59	59	60	60	60	60	60
เริ่มต้นฝึกแบบฝึกหัดเพื่อเรียนรู้เกี่ยวกับโปรแกรม MATLAB	←→									
ศึกษา และกำหนดขอบเขตของงาน		←→								
ศึกษา และ ทำความเข้าใจบทความที่เกี่ยวข้อง			←→							
เขียนโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า				←→						
วางแผนและพัฒนาโปรแกรมให้รองรับการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ บัสหนึ่ง บัส โดยใช้ Load margin				←→						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยเรื่องการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของการหาตำแหน่งของบัสที่มีค่าเสถียรภาพแรงดันต่ำที่สุด และทำการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่จะติดตั้ง ณ ตำแหน่งบัสนั้นๆ เพื่อให้ได้ค่าเสถียรภาพแรงดันที่มีค่าที่ดีกว่าเดิม โดยใช้วิธีการคัดแยกหาค่าตอบและวิธีการหาค่าซิวัด L

2.2 การคำนวณ Power Flow ด้วยวิธีการ Newton-Raphson Method

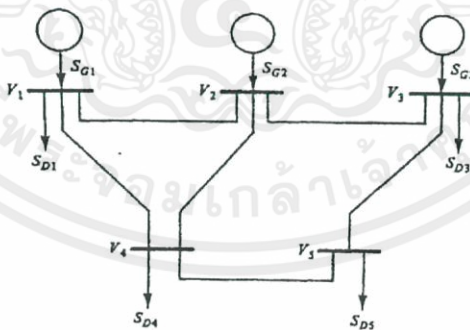
การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) เป็นการศึกษาสถานะการส่งและรับกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ในระบบ รวมถึงการคำนวณหาค่าแรงดัน มุมของแรงดัน กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสต่างๆ ในระบบ สามารถศึกษาได้ทั้งภาวะปกติ (Steady state) และในสภาวะไม่ปกติ (Fault) และยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปช่วยตัดสินใจในเรื่องเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (Power System stability)

2.2.1 Power Flow Equation

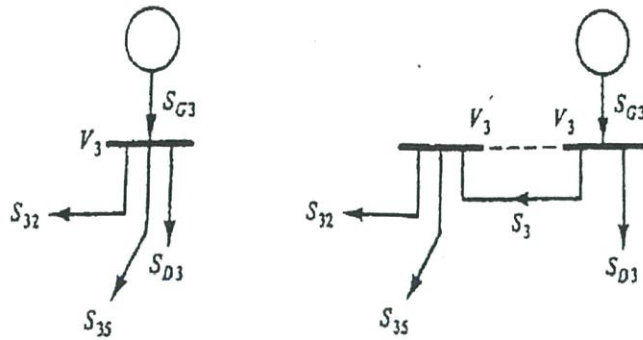
เรากำหนด per phase กำลังบัส S_i ตามสมการ (2.1)

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (2.1)$$

จากรูปที่ 2.1 เราแยกบัส 3 ออกมา ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.1 System One-line diagram



รูปที่ 2.2 บัส 3

S_3 คือ กำลังบัสสุทธิที่ป้อนเข้าไปในบัส 3

เมื่อเรารวม S_{ik} ทุกสายส่งที่เชื่อมต่อกับบัส i_{th}

$$S_i = \sum_{k=1}^n S_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

เราสามารถหาค่าของกระแส I_i ได้จากสมการ

$$I_i = |G_i| |D_i| = \sum_{k=i}^n |I_{ik}| \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

$$I = Y_{bus} V \quad (2.4)$$

โดยจะได้สมการ I สำหรับ i_{th} บัส

$$I_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.5)$$

ซึ่งสามารถคำนวณกำลังของบัส i_{th} ได้จากสมการ (2.5)

$$S_i = V_i I_i^* = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* V_k^* \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

สมมติให้

$$\theta_{ik} \triangleq \theta_i - \theta_k$$

$$Y_{ik} \triangleq G_{ik} - jB_{ik}$$

จากสมการ (2.2) จะกลายเป็น

$$S_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| e^{j\theta_{ik}} (G_{ik} - jB_{ik})$$

$$S_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (\cos \theta_{ik} + j \sin \theta_{ik}) (G_{ik} - jB_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

สมการ (2.5) และ (2.6) ทั้งสองอยู่ในรูป Equivalent ของสมการ Power Flow เราสามารถจัดให้อยู่ในรูปจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ จะได้สมการ

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)]$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)] \quad (2.8)$$

2.2.2 วิธีการ Newton-Raphson Iteration

$$f(x-\Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \text{h.o.t.} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ h.o.t. คือ ลำดับเทอมที่สูงกว่า (higher-order terms) ในกรณีที่เวกเตอร์อนุกรมเทย์เลอร์ (vector Taylor series) ถูกแทนที่ด้วยมากกว่าหนึ่งสมการ เราจะได้ n สมการ

$$\begin{aligned} f_1(x-\Delta x) &= f_1(x) + \frac{df_1(x)}{dx_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{df_1(x)}{dx_n} \Delta x_n + \text{h.o.t.} \\ f_2(x-\Delta x) &= f_2(x) + \frac{df_2(x)}{dx_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{df_2(x)}{dx_n} \Delta x_n + \text{h.o.t.} \\ &\vdots \\ f_n(x-\Delta x) &= f_n(x) + \frac{df_n(x)}{dx_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{df_n(x)}{dx_n} \Delta x_n + \text{h.o.t.} \end{aligned} \quad (2.10)$$

เราจะได้

$$f(x+\Delta x) = f(x) + J(x)\Delta x + \text{h.o.t.} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{df_1(x)}{dx_1} & \dots & \frac{df_1(x)}{dx_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{df_n(x)}{dx_1} & \dots & \frac{df_n(x)}{dx_n} \end{bmatrix} \quad \Delta x \triangleq \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_3 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

โดย $J(x)$ คือ Jacobian Matrix ของ f ที่ถูกประเมินค่าที่ x เมื่อเปรียบเทียบกับ (2.11) กับ (2.7) อย่างละเอียด เราจะได้ว่า $J(x)$ คือ อนุพันธ์สเกลาร์ $f'(x)$ ในกรณีนี้ เราจะได้สมการ Newton-Raphson Iteration

$$x^{v+1} = x^v - [J(x^v)]^{-1} f(x^v) \quad (2.13)$$

กำหนดให้

$$\Delta x^v \triangleq x^{v+1} - x^v \quad (2.14)$$

เราจะเขียนสมการ Newton-Raphson Iteration ใหม่ได้ว่า

$$-J^v \Delta x^v = f(x^v) \quad (2.15)$$

2.2.3 การประยุกต์ใช้ใน Power Flow Equation

พิจารณา (2.7) เพื่อแก้ปัญหา Power Flow Equation สำหรับ Newton-Raphson calculation รูปแบบสมการ Power Flow Equation ที่ใช้ได้มาจาก (2.7)

เมื่อเราแทนส่วนจริงและส่วนจินตภาพ เราจะได้

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad i = 1, 2, \dots, n \\ Q_i &= \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)] \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.16)$$

เราสมมติ $|V_1|$ และ θ_1 เท่ากับ 0 จะเหลือตัวที่เราไม่รู้ค่า คือ $(n-1)$ -เวกเตอร์ $\theta, |V|$ และ x

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad |V| = \begin{bmatrix} |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \theta \\ |V| \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เรานิยามให้ฟังก์ชันของสมการที่ (2.13) เป็นฟังก์ชันของตัวแปรไม่ทราบค่า x และเรากำหนดค่าฟังก์ชัน $P_i(x)$ และ $Q_i(x)$ โดย

$$P_i(x) \triangleq \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$Q_i(x) \triangleq \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)] \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ถ้าเรากำหนดค่า x ทางฟังก์ชันเป็นส่วนประกอบจริงและเสมือนของบัสกำลังไฟฟ้า เราสามารถแทน (2.13) เป็นสมการ equivalent เราจะได้

$$P_i = P_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$Q_i = Q_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.18)$$

ในสมการ P_i และ Q_i ถูกระบุด้วยค่าคงที่ ในขณะที่ $P_i(x)$ และ $Q_i(x)$ ถูกระบุด้วยฟังก์ชันไม่ทราบค่า x ในตอนนี้เรากำหนดให้ $f(x) = 0$ และย้ายฟังก์ชันของสมการ (2.10) ได้

$$P_i(x) - P_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$Q_i(x) - Q_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.15) กำหนดให้ $2n-2$ เป็นส่วนประกอบของฟังก์ชัน $f(x)$ ดังนั้น $f_1(x) = P_2(x) - P_2$, $f_2(x) = P_3(x) - P_3$, ..., $f_{2n-2}(x) = Q_n(x) - Q_n$ ในรูปของเมทริกซ์

$$f(x) \triangleq \begin{bmatrix} P_2(x) - P_2 \\ \vdots \\ P_n(x) - P_n \\ \vdots \\ Q_2(x) - Q_2 \\ \vdots \\ Q_n(x) - Q_n \end{bmatrix} = 0 \quad (2.20)$$

ต่อไปเราพิจารณา J Jacobian matrix

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

จาก Newton-Raphson Iteration

$$-J^v \Delta x^v = f(x^v) \quad (2.22)$$

ทำการ mismatch vector

$$\Delta P(x) = \begin{bmatrix} P_2(x) - P_2 \\ \vdots \\ P_n(x) - P_n \end{bmatrix} \quad \Delta Q(x) = \begin{bmatrix} Q_2(x) - Q_2 \\ \vdots \\ Q_n(x) - Q_n \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

จาก (2.18) จัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชัน $f(x)$ ใหม่ได้

$$f(x) = - \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

จาก (2.17), (2.21) และ (2.24) แทนลงใน (2.22)

$$\begin{bmatrix} J_{11}^V & J_{12}^V \\ J_{21}^V & J_{22}^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^V \\ \Delta |V|^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(x^V) \\ \Delta Q(x^V) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

เราจะได้รูปแบบของสมการ Power Flow Equation โดยวิธีการ Newton-Raphson Iteration ในสมการ (2.25)

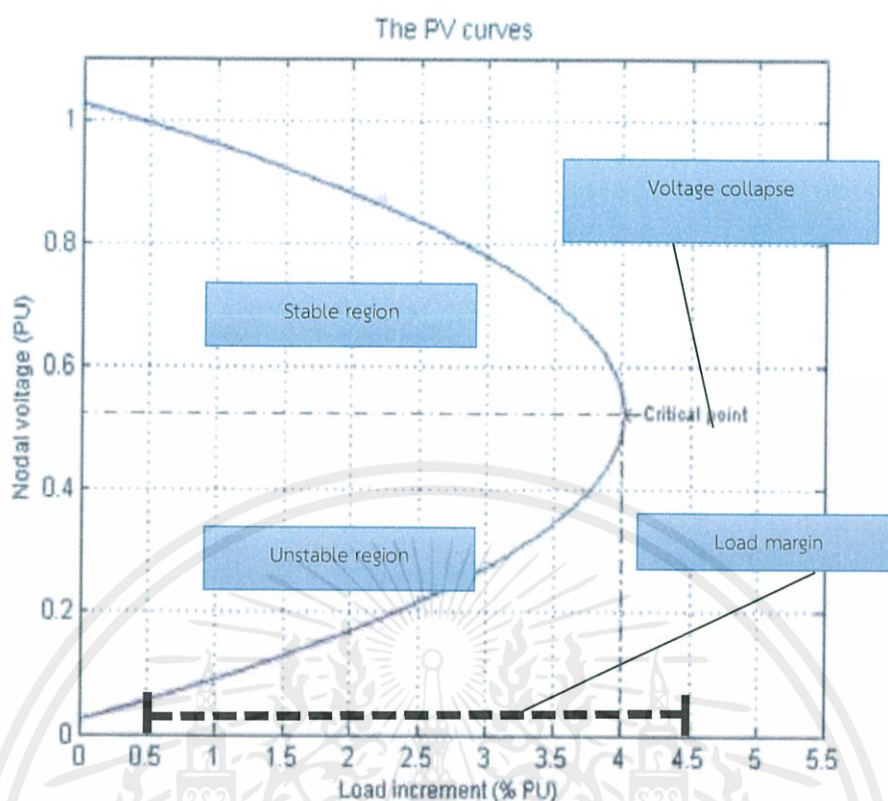
2.3 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability)

เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถของระบบในการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสให้สามารถทำงานได้อย่างปกติหลังจากที่เกิดการรบกวนต่อระบบ เมื่อเสถียรภาพทางแรงดันลดลงอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าของบัสสูงขึ้นหรือตกลงได้ และอาจนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดันในที่สุด ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นคือ การตัดภาระทางไฟฟ้า (Load shedding) และการสูญเสียสภาพเชิงโครนิซึมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ

2.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

PV Curve คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางไฟฟ้าในหน่วยกำลังไฟฟ้าจริง (Watt) เทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าของบัส ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและใช้พื้นฐานการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า การพล็อตกราฟ PV Curve สามารถทำได้โดยการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าจนกว่าระดับแรงดันจะถึงจุดจุดวิกฤต (nose point) ที่จุดนี้เป็นจุดที่ระบบสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันที่จุดนี้เรียกว่า แรงดันวิกฤต

PV Curve ใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า ขอบเขตเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าในเชิงภาระทางไฟฟ้า (Load margin) พิจารณาได้จากกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนถึงการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (Load increment หรือ Load margin) กับ แรงดันไฟฟ้าที่บัส (Nodal voltage)

จากรูปที่ 2.3 ลักษณะกราฟเป็นรูปแบบพาราโบลาคว่ำ ส่วนบนของกราฟแสดงถึงพื้นที่เสถียรภาพทางไฟฟ้าที่ระบบสามารถรองรับภาระทางไฟฟ้าได้ (Stable region) และที่จุดวิกฤต (Critical point) หรือจุดพังทลายของแรงดัน (Voltage collapse) คือขอบเขตของเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าของระบบ ในกราฟส่วนล่างจะเป็นส่วนที่ไม่มีความเสถียรภาพทางระบบไฟฟ้า (Unstable region)

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

2.3.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าเสมือนต่อเสถียรภาพระดับแรงดันไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ปรากฏในระบบไฟฟ้ามีสองประเภทคือ แบบเหนี่ยวนำ (inductive) และแบบเก็บประจุ (capacitive) กำลังไฟฟ้าเสมือนทั้งสองประเภทรูปแบบนั้นสามารถถูกใช้และผลิตได้จากภาระทางไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงนั้นถูกใช้ในการสร้างงานหรือพลังงาน ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นองค์ประกอบสำคัญในการดำเนินการและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นอย่างมาก หากกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบต่ำเกินไปจนตัวชดเชย

กำลังไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้จะส่งผลกระทบต่อ ภาระไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น หม้อแปลงจะไม่สามารถควบคุมระดับแรงดันได้จนนำไปสู่การพังทลายของแรงดันหรือสภาวะแบล็คเอาต์ (Blackout) และถ้าปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไม่เพียงพอที่จะทดแทนการสูญเสียที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ก็จะมีผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะมีผลกระทบต่อการใช้ของกำลังไฟฟ้าจริงด้วย แต่ถ้าหากกำลังไฟฟ้าเสมือนมีมากเกินไปกระแสที่ไหลในสายส่งก็จะสูงมากและส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังในสายส่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย (Distributed Generation)

การผลิตไฟฟ้าเชิงกระจายตัว เป็นการใช้เทคโนโลยีขนาดย่อมในการผลิตกระแสไฟฟ้าในบริเวณที่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้า เทคโนโลยีของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเชิงกระจายตัวจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายขนาดเล็กต่างๆ เช่น กังหันลมขนาดเล็ก เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) ซึ่งสามารถให้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ในหลายๆกรณี แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายตัวสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยต้นทุนและค่าใช้จ่ายระยะยาวที่ต่ำ มีความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยที่สูงด้วยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่ำกว่าแหล่งผลิตแบบเก่า

2.4.1 ตัวอย่างพลังงานไฟฟ้าแบบดั้งเดิม – แบบจำลองสถานีส่วนกลาง

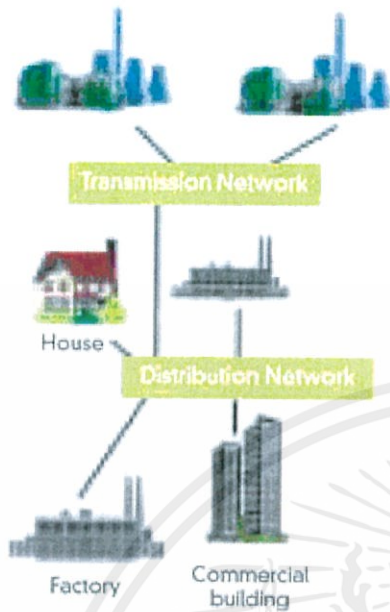
ตัวอย่างแบบจำลองจากประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงถึงแบบจำลองของการผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งกำลังการผลิตส่วนใหญ่มาจากโรงไฟฟ้าส่วนกลางที่ผลิตพลังงานจากการเผาไหม้ (ถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติ) หรือพลังงานนิวเคลียร์ รูปแบบการส่งจ่ายเช่นนี้จำเป็นที่จะต้องส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ที่อยู่ห่างไกล ซึ่งอาจมีระยะห่าง 100 ไมล์จากสถานีย่อย

รูปแบบโรงไฟฟ้าส่วนกลางแบบดั้งเดิมมีข้อเสียอยู่มาก ตัวอย่างเช่น ปัญหาด้านระยะทาง, ปัญหาด้านการเกิดภาวะเรือนกระจก, ปัญหาของเสียดังจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์, การสูญเสียพลังงานในสายส่งเมื่อต้องจ่ายพลังงานให้ระยะไกล, การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมตามรายทางเมื่อเส้นทางส่งจ่ายพลังงานถูกสร้าง และปัญหาด้านเสถียรภาพและความปลอดภัย

ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการกระจายการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการติดตั้งแหล่งผลิตพลังงานให้อยู่ใกล้หรือติดกับแหล่งผู้ใช้ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่สายส่งมีปัญหาด้านเสถียรภาพ การผลิตไฟฟ้าเชิงกระจาย (Distributed Generation : DG) คือการใช้แหล่งผลิตพลังงานขนาดเล็กเช่นแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งสามารถนำมาติดตั้งแบบแยกเพียงลำพังหรือรวมอยู่ในโครงข่ายพลังงานที่มีอยู่แล้ว บ่อยครั้งที่ผู้ใช้แผงโซลาร์เซลล์สามารถผลิตพลังงานคืนสู่โครงข่ายเมื่อพวกเขาใช้พลังงานน้อยกว่าพลังงานที่แผงโซลาร์เซลล์ผลิตได้ซึ่งเป็นประโยชน์ให้ต่อโครงข่ายพลังงานและผู้ใช้ไฟฟ้า

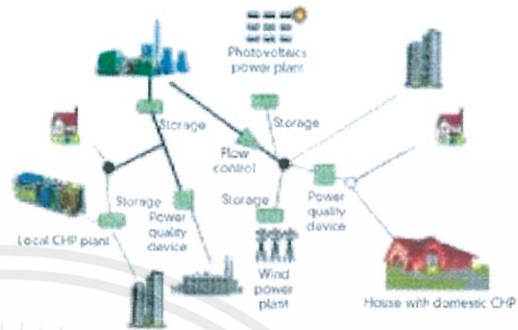
Yesterday

Central power station



Tomorrow

distributed/on-site generation with fully integrated network management



รูปที่ 2.5 Distributed Generation (DG) Electricity

Paradigm

รูปที่ 2.4 Classic Electricity Paradigm

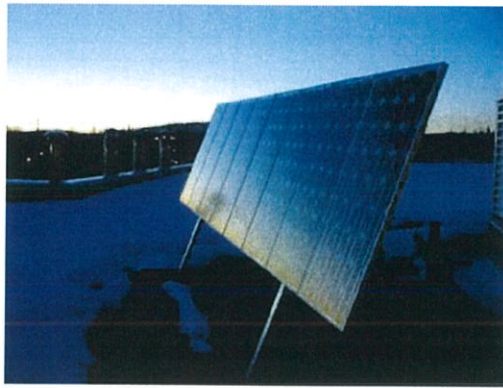
2.4.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าเชิงกระจาย

การผลิตไฟฟ้าเชิงกระจายจะเกิดขึ้นในสองระดับ คือระดับชุมชน (local) และระดับครัวเรือน (Users) ในระดับชุมชน การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายจะต้องดูความเหมาะสมของสภาพแวดล้อมในชุมชนในการเลือกใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทน เช่น กังหันลม เทคโนโลยีพลังงานความร้อนใต้พิภพ แผงโซลาร์เซลล์ และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ซึ่งแหล่งผลิตพลังงานเหล่านี้จะมีขนาดเล็กกว่าและกระจายตัวอยู่มากกว่าโรงไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ซึ่งในหลายครั้งเทคโนโลยีเหล่านี้ก็สามารถผลิตพลังงานได้มากกว่า มีค่าใช้จ่ายระยะยาวที่คุ้มค่ากว่า และมีความน่าเชื่อถือที่สูงกว่า จากการที่เทคโนโลยี DG เหล่านี้ถูกสร้างขึ้นให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของท้องถิ่น จึงส่งผลกระทบต่อพลังงานและสภาพแวดล้อมได้น้อยกว่าโรงไฟฟ้าส่วนกลาง



รูปที่ 2.6 Wind Turbines at Buffalo Mountain, Tennessee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 Solar Panels help Power this Elementary School in Fairbanks, Alaska



รูปที่ 2.8 A 300 kW Capstone Micro-turbine at a Demonstration Project at the Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, Tennessee

ในระดับครัวเรือนนั้นก็สามารถใช้เทคโนโลยี DG ได้เช่นเดียวกับในระดับชุมชนซึ่งให้ผลที่คล้ายกัน เทคโนโลยีที่นิยมใช้ใช้กันก็คือ เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) ตัวอย่างเช่น หน่วยงานแห่งหนึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีนี้เป็นแหล่งพลังงานสำรองจากโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีนี้ก็สามารถติดตั้งเป็นแหล่งพลังงานสำรองภายในบ้านได้ จากตัวอย่างทั้งหลายเหล่านี้ ทำให้เห็นว่าเทคโนโลยี DG นั้นสามารถทำงานในฐานะแหล่งผลิตที่แยกตัวจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือสามารถเป็นแหล่งผลิตที่ส่งพลังงานกลับคืนสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้

2.5 วิธีการคัดแยกหาคำตอบ (Separately Optimize Method)

เป็นวิธีที่ใช้หาสถานที่ติดตั้งและขนาดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายโดยใช้อัลกอริทึม ในการหาค่าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่บัส i เมื่อฟังก์ชัน F_i คือค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชัน P_{DG_i} โดยเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชัน P_{DG_i} จากค่าที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ไปยังค่าที่มากที่สุด เพื่อให้ค่าของฟังก์ชัน P_{DG_i} เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่แก้ปัญหาที่ทำให้ฟังก์ชัน F_i มีขนาดใหญ่ที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 รูปแบบของปัญหา

รูปแบบของปัญหาของการหาค่าฟังก์ชัน F_i ที่มากที่สุด

จุดประสงค์ : หาค่าที่มากที่สุดของ $F_i = \sum_{i=1}^n S_{L,1} - \sum_{i=1}^n S_L$

ข้อจำกัด : $S_g - S_L - S(V, \theta) = 0$ (2.26)

$P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max}$ (2.27)

$S(V, \theta) - S_{\max} \leq 0$ (2.28)

F_i : คือฟังก์ชันของค่าเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ (V)

S_g : เป็นค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MVA)

S_L : เป็นค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด (MVA)

$S_{L,1}$: เป็นค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเมื่อรันสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (MVA)

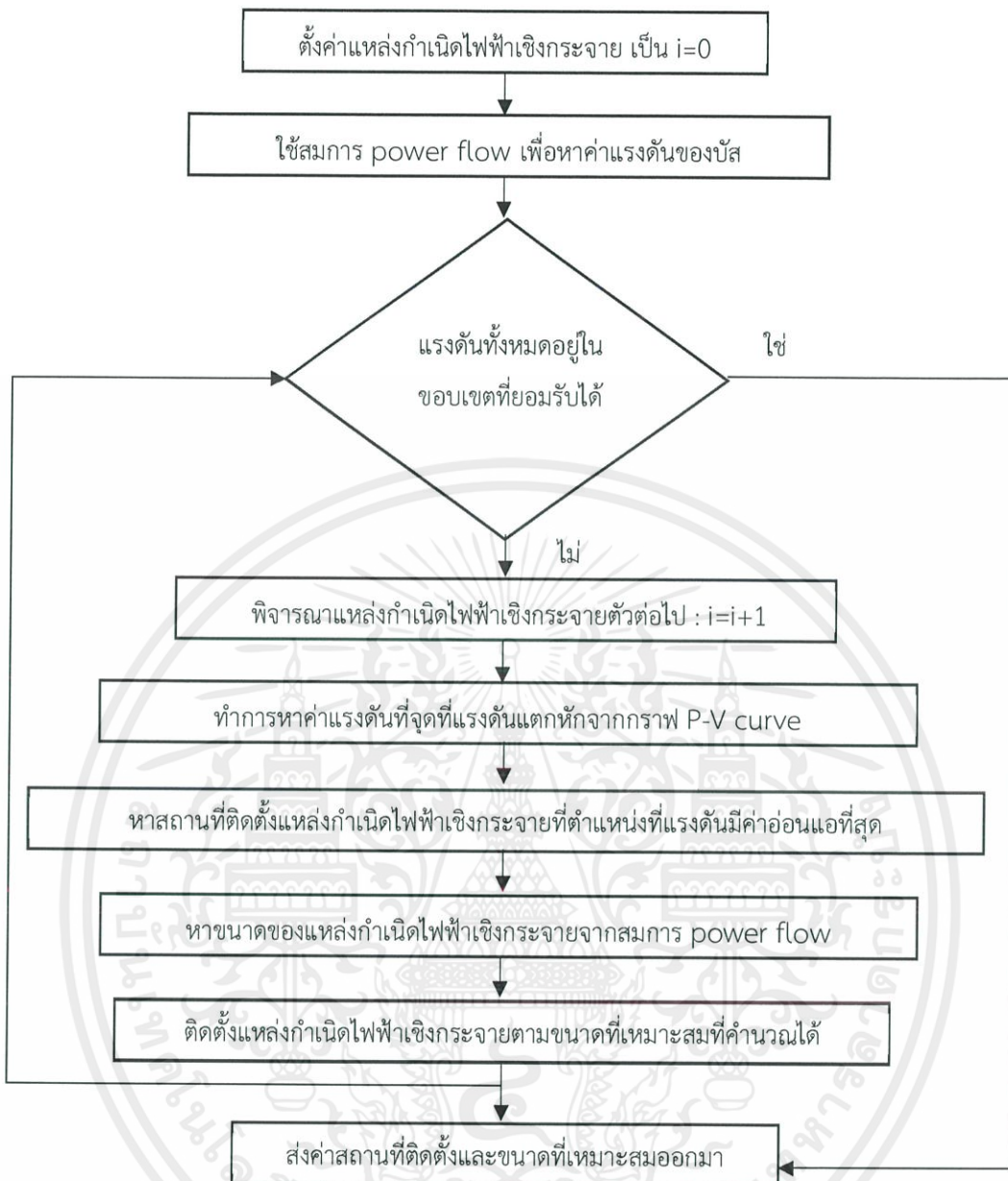
$S(V, \theta)$: เป็นค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ (MVA)

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

(2.26) คือ สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ

(2.27) คือ ปริมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าในช่วงการผลิต

(2.28) คือ การกำหนดกำลังไฟฟ้าไม่ให้เกินขอบเขต



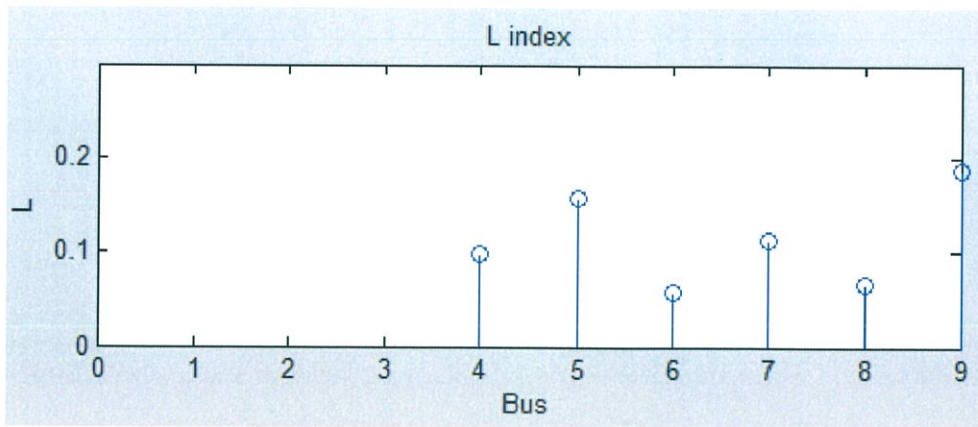
รูปที่ 2.9 แผนผังโปรแกรมของวิธีการคัดแยกคำตอบ

2.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันด้วยวิธีการ L-Index

เป็นวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพของแรงดันในระบบไฟฟ้าวิธีหนึ่ง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการหาค่าดัชนีเสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว โดยจะนำไปใช้ในกระบวนการคัดแยกหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Separately-optimized method) เพื่อให้ได้ความสามารถการคำนวณที่รวดเร็วกว่าวิธีการที่ใช้ค่า Load margin จาก PV Curve

ค่า L คือ ค่าดัชนีสำหรับการประมาณค่าเสถียรภาพไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะมีค่าระหว่างศูนย์ (ระบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า) กับหนึ่ง (เกิดการพังทลายของแรงดัน) หรือ $(0 \leq L \leq 1)$ ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กราฟค่า L ของระบบอ้างอิง IEEE: Case 9

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าบัสที่ 9 มีค่า L สูงที่สุด ถ้าเกิดภาวะทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ซึ่งจะมีผลทำให้แรงดันตกลง) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 9 จะเข้าใกล้จุดพังทลายของแรงดันก่อนบัสอื่น เพราะฉะนั้นบัสที่ 9 จึงเป็นบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันน้อยที่สุด เราจึงควรติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่ตำแหน่งบัสที่ 9 เพื่อช่วยให้การรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.6.1 การคำนวณหาค่า L ในระบบไฟฟ้า

ในการพิจารณาระบบที่มีบัสจำนวน N และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน N_G สามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่าง

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

เมื่อ I_G, I_L และ V_G, V_L แทน กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสของภาวะทางไฟฟ้าจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

และ

$$F_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}] \quad (2.31)$$

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{N_G} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \angle \theta_{ji} + \delta_i - \delta_j \right| \quad (2.32)$$

เมื่อ i, j คือ ตำแหน่งบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ภาวะไฟฟ้าตามลำดับ

V_i, V_j คือ ขนาดแรงดันที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และภาวะไฟฟ้าตามลำดับ

θ_{ij} คือ มุมเฟสในรูปของเมทริกซ์ F_{ij}

δ_i, δ_j คือ มุมระหว่างเฟสของแรงดันบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และภาวะไฟฟ้าตามลำดับ

ในการพิจารณาหาค่า L จะพิจารณาจากบัส N มีค่า L สูงสุด เนื่องจากเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดที่จะเกิดภาวะพังทลายของแรงดันได้

$$L = \text{MAX}_{j \in L} [L_j] \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 บัสในประเทศไทย

จากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตในประเทศไทยที่แสดงถึงการจัดตั้งสถานีไฟฟ้าต่างๆ ในประเทศไทยมีจำนวน 124 บัส

2.7.1 เพอร์ยูนิต (Per Unit)

เพอร์ยูนิต คือ ปริมาณที่เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณจริง (Actual Quantity) และ ปริมาณฐาน (Reference Base Quantity)

$$\text{Per Unit} = \frac{\text{Actual}}{\text{Base}} \quad (2.34)$$

ปริมาณที่ต้องหาค่าเพอร์ยูนิต ได้แก่ อิมพีแดนซ์ (Impedance, Z) แรงดัน กระแส (Current, I) กำลังไฟฟ้า (Power, S)

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

1) การหาค่าฐานระบบ 1 เฟส (Single Phase System)

การคำนวณหาค่าฐาน ต้องกำหนดค่าฐานอ้างอิงขึ้นมา 2 ค่า เช่น ฐานของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base},1\phi}}{V_{\text{base,LN}}} \quad (2.35)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} = \frac{(V_{\text{base}})^2}{S_{\text{base}}} \quad (2.36)$$

2) การหาค่าฐานระบบ 3 เฟส (Three Phase System)

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base},1\phi}}{\sqrt{3}V_{\text{base,LN}}} \quad (2.37)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{\sqrt{3}I_{\text{base}}} = \frac{(V_{\text{base}/3})^2}{(S_{\text{base}/3})} \quad (2.38)$$

$$S_{\text{p.u.},1\phi} = S_{\text{p.u.},3\phi} \quad (2.39)$$

2.7.2 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์

ในทางวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง แอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ คือเมทริกซ์จัตุรัสขนาด $n \times n$ ที่แสดงค่าความสัมพันธ์แอดมิตแตนซ์ของโหนดต่างๆในระบบ เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังจริงอาจมีบัสจำนวนมาก โดยมีสมการและขั้นตอนการคิดดังนี้

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} \quad (2.40)$$

$$Y = \frac{1}{Z} = Z^{-1} \quad (2.41)$$

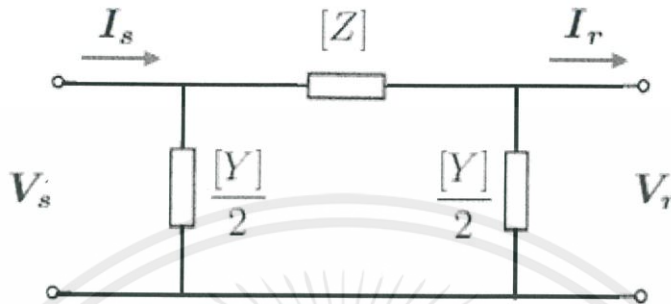
$$I = Y_{\text{bus}} V_s \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ระหว่างบัส i และบัส j

วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย (Equivalent pi circuit: π)



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของสายส่งแบบพาย

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

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

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

2.7.3. การหาอิมพีแดนซ์

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad (2.44)$$

Z_{bus} คือ อิมพีแดนซ์ เมทริกซ์ Y_{bus} คือ แอดมิตแตนซ์ เมทริกซ์

2.7.4 ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจะทำการจำแนกบัสในระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. บัสอ้างอิง (Slack bus) จะกำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า โดยบัสอ้างอิงมีไว้เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยให้กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบและชดเชยความแตกต่างของกำลังการผลิตและภาระทางไฟฟ้าของระบบ

2. บัสควบคุมแรงดัน (PV bus) จะกำหนดให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสคงที่ส่วนมุมของแรงดันและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บัสของภาระทางไฟฟ้า (PQ bus) จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนบัสคงที่ ส่วนขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

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

2.7.5 การคำนวณกำลังการผลิต

2.7.5.1 กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power)

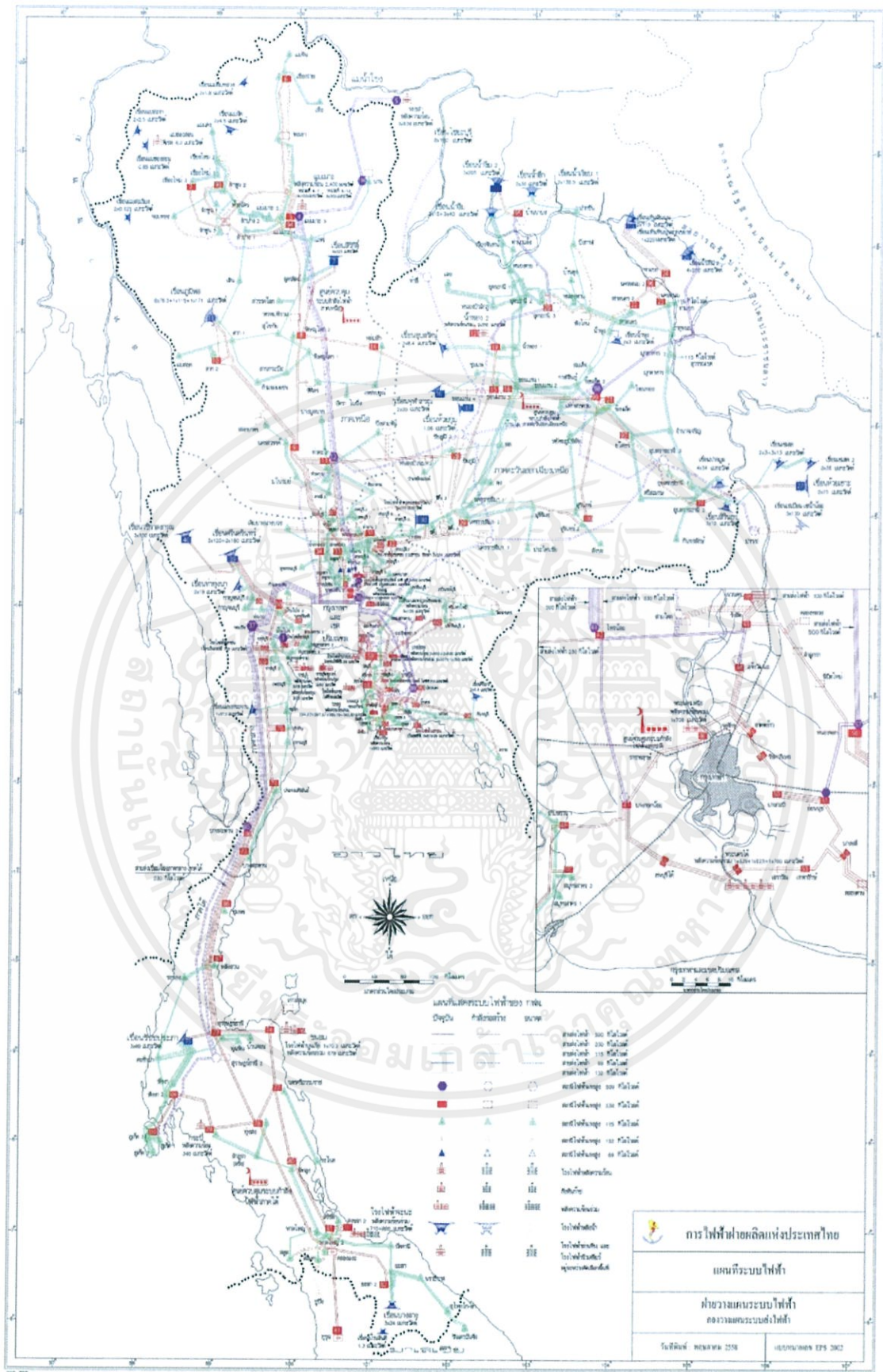
$$P = VI_R = VI \cos(\delta - \beta) \quad (\text{W}) \quad (2.45)$$

2.7.5.2 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power)

$$Q = VI_x = VI \sin(\delta - \beta) \quad (\text{Var}) \quad (2.46)$$

2.7.6 การคำนวณโหลด

$$P_R = VI_R = \frac{V^2}{R} = I_R^2 R \quad (\text{W}) \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.12 แผนที่สถานีไฟฟ้า(Bus) ณ สถานที่ต่างๆ ของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 บทนำ

ในปริญาพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนของการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธี Separately-optimized โดยใช้โปรแกรม MATLAB
2. ส่วนของการทดลองเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีต่างๆ ซึ่งในส่วนนี้จะแบ่งเป็น 4 กรณี คือ
 - 1) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อยังไม่ได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ค่าชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin จาก PV Curve
 - 2) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดเพียงตำแหน่งเดียว
 - 3) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อยังไม่ได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ค่าชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index รวมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากกรณีที่ใช้ค่าชี้วัด Load margin จาก PV Curve
 - 4) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง

โดยรูปที่ 3.1 แสดงแผนผังโปรแกรมการคำนวณหา Load margin จาก PV Curve รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังโปรแกรมการคำนวณหา L-Index ของระบบไฟฟ้ากำลัง รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังของโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่บัสเดียว ด้วยวิธี Separately-optimized และรูปที่ 3.4 แสดงแผนผังของโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่หลายบัส ด้วยวิธี Iterative separately-optimized โดยจะทำการทดลองกับระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus ทั้งหมด 3 การทดลอง ดังนี้

1. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin จาก PV Curve เพื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ ตำแหน่งเดียว

2. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index พร้อมเปรียบเทียบกับค่าชี้วัด Load margin เพื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ ตำแหน่งเดียว

3. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย และเปรียบเทียบกับราคาในการดำเนินการก่อนการติดตั้ง

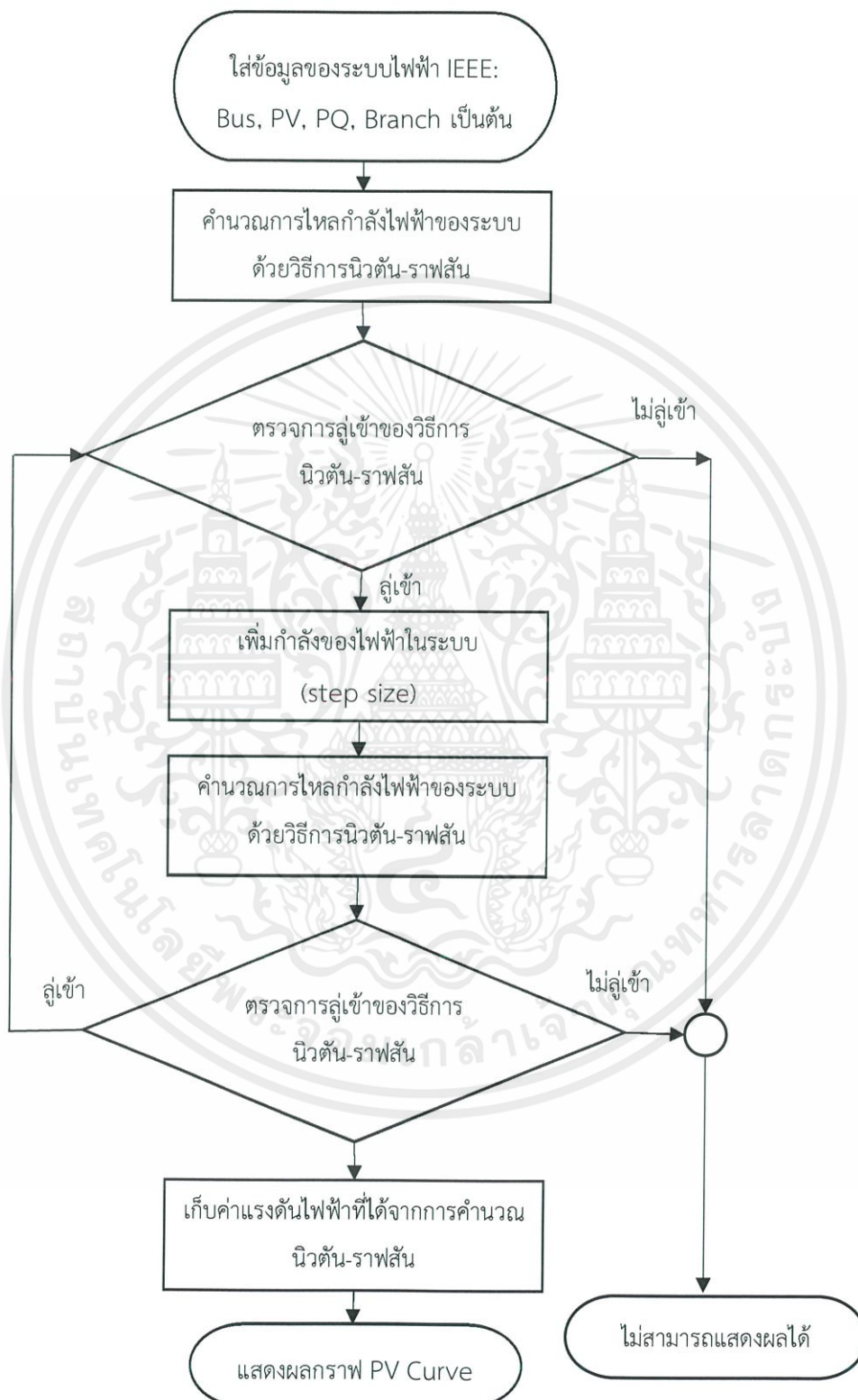
4. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin จาก PV Curve เพื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ หลายตำแหน่ง

5. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index พร้อมเปรียบเทียบกับค่าชี้วัด Load margin เพื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ หลายตำแหน่ง



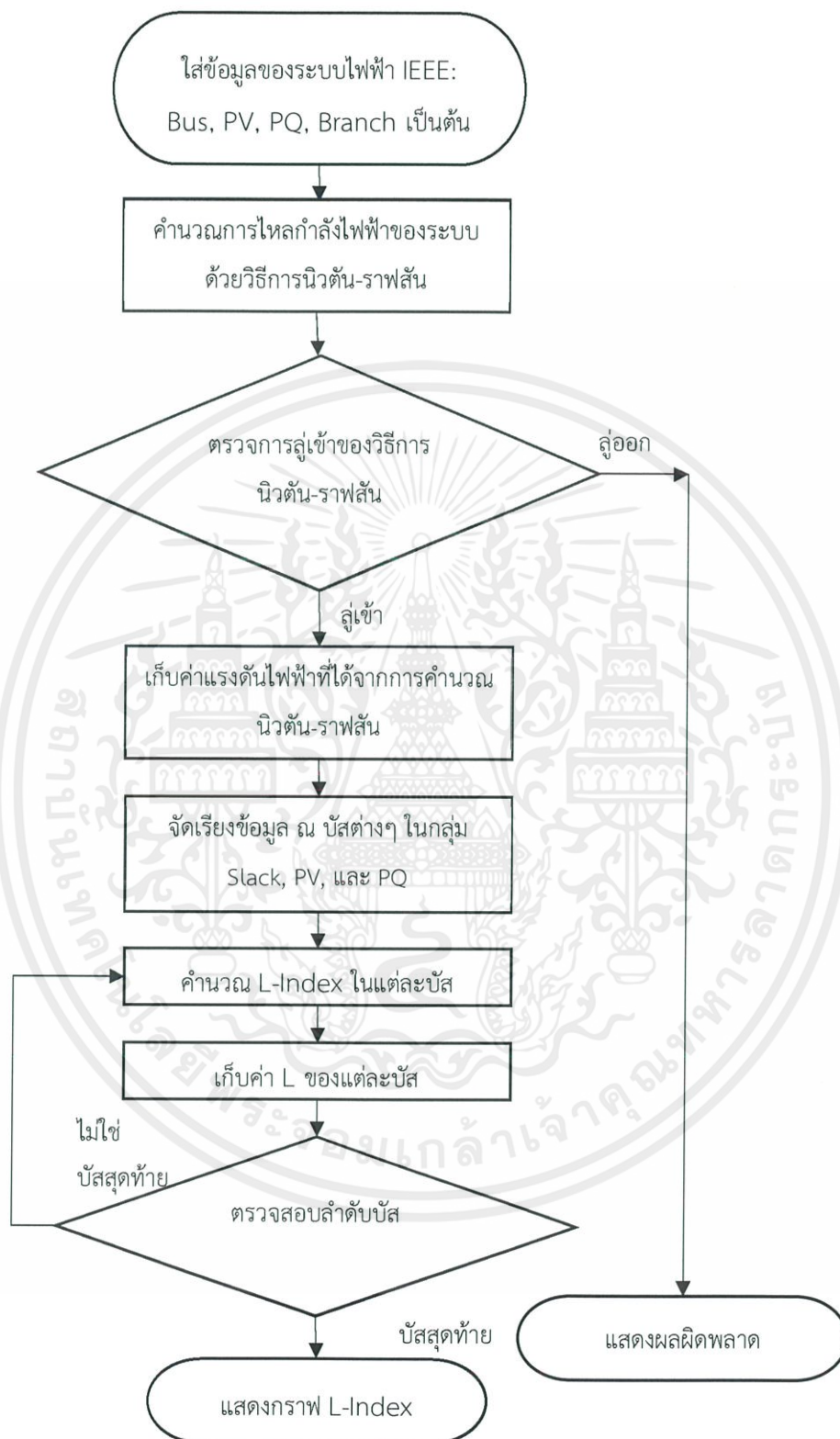
3.2 แผนผังขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม

3.2.1 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา PV Curve



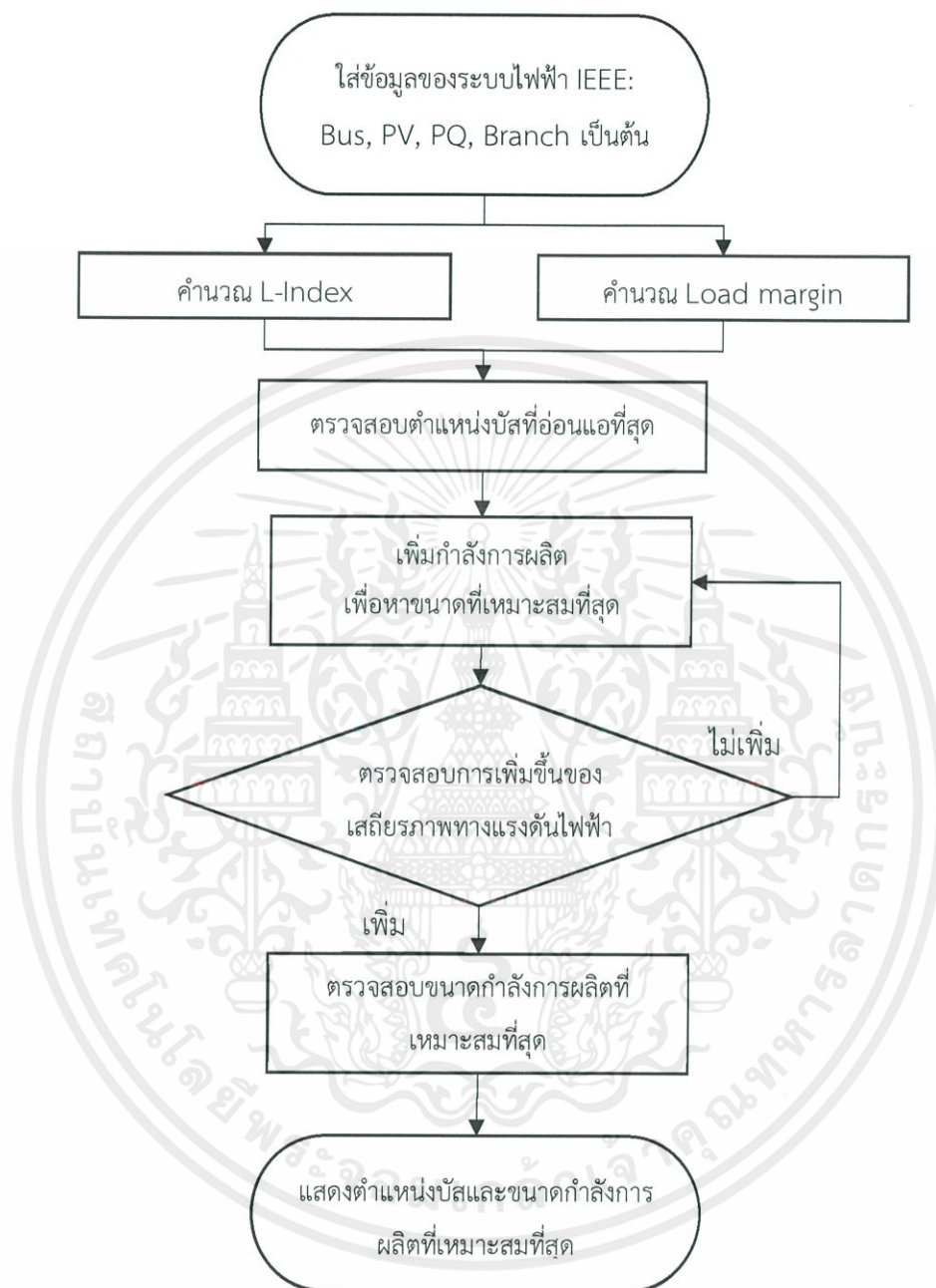
รูปที่ 3.1 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา PV Curve

3.2.2 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา L-Index



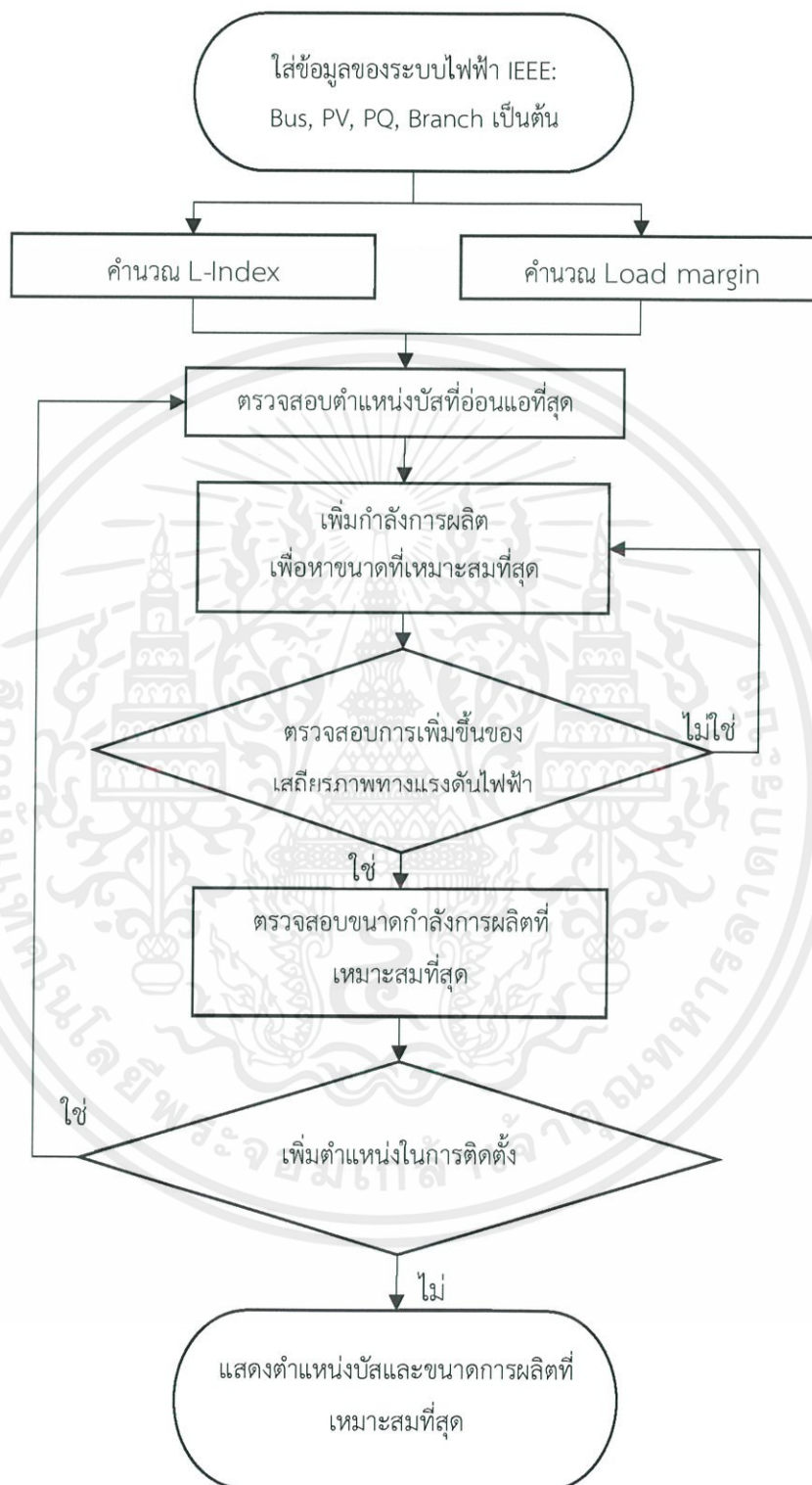
รูปที่ 3.2 แผนผังโปรแกรมการคำนวณหา L-Index

3.2.3 แผนผังโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่บัสเดียว



รูปที่ 3.3 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่บัสเดียว

3.2.4 แผนผังโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่หลายบัส



รูปที่ 3.4 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่หลายบัส

3.3 การทดลอง

3.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการพัฒนาของระบบไฟฟ้ากำลัง

- 1) กำลังไฟฟ้าจริงของการผลิต (P_g)
- 2) แรงดันของการผลิต (V_g)
- 3) แรงดันของทุบัส (V)
- 4) กำลังไฟฟ้าจริงของระบบที่บัสภาระทางไฟฟ้าต่างๆ (P_d)
- 5) กำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบที่บัสภาระทางไฟฟ้าต่างๆ (Q_d)

3.3.2 การทดลองที่ 1

1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพียงหนึ่งตำแหน่งด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin

วัตถุประสงค์

หาดำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ค่า Load margin

วิธีการทดลอง

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Initial power flow solution)
- 2) หาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow solution) โดยใช้วิธี Newton-Raphson ในการแก้ปัญหาการสมการไม่เป็นเชิงเส้น
- 3) เพิ่มโหลดของระบบ แล้วหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จุดถัดไปจนถึงจุดที่ไม่สามารถหาคำตอบให้กับระบบได้ (Critical point หรือ voltage collapse point)
- 4) ตรวจสอบหาบัสที่อ่อนแอที่สุดจากเส้นกราฟที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด ณ จุด Critical point แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้จากแต่ละกรณี

1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดเพียงหนึ่งตำแหน่งด้วยค่า Load margin

วัตถุประสงค์

หาขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยใช้ค่า Load margin

วิธีการทดลอง

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Initial power flow solution)
- 2) ทำการทดลองที่ 1 เพื่อหาบัสที่อ่อนแอที่สุด (บัสที่มีเสถียรภาพแรงดันแย่มากที่สุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ใช้วิธี Separately-optimized เพื่อวิเคราะห์หาขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยลดภาระทางไฟฟ้าได้มากที่สุด
- 4) ใส่ค่ากำลังการผลิตที่หาได้จากข้อ 3 เป็นค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า แล้วทำการทดลองที่ 1 อีกครั้ง เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายเพื่อช่วยลดภาระ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด

3.3.3 การทดลองที่ 2

2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index

วัตถุประสงค์

หาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ค่า L-Index

วิธีการทดลอง

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Initial power flow solution)
- 2) หาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow solution) โดยใช้วิธี Newton-Raphson ในการแก้ปัญหาระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น
- 3) จัดเรียงข้อมูลแต่ละบัสที่ได้จากข้อ 2 ตามกลุ่ม Slack, PV, PQ ตามลำดับ แล้วคำนวณหาค่า L ของ PQ บัสทั้งหมด
- 4) ตรวจสอบหาบัสที่อ่อนแอที่สุดแล้วเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแต่ละกรณี

2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดด้วยตัวชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index

วัตถุประสงค์

หาขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยใช้ค่า L-Index

วิธีการทดลอง

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Initial power flow solution)
- 2) ทำการทดลองที่ 1 เพื่อหาบัสที่อ่อนแอที่สุด (บัสที่มีเสถียรภาพแรงดันแย่มากที่สุด)
- 3) ใช้วิธี Separately-optimized เพื่อวิเคราะห์หาขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยลดภาระทางไฟฟ้าได้มากที่สุด

- 4) ใส่ค่ากำลังการผลิตที่หาได้จากข้อ 3 เป็นค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า แล้วทำการทดลองที่ 1 อีกครั้ง เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายเพื่อช่วยลดภาระ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด

2.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันทั้งสองค่า

วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันทั้งสองค่าคือ L-Index และ Load margin

วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองที่ 1, การทดลองที่ 2.1, และการทดลองที่ 2.2 เพื่อบันทึกผล
- 2) วิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการ แล้วสรุปผล

3.3.4 การทดลองที่ 3

วัตถุประสงค์

วิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

วิธีการทดลอง

- 1) คำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อนการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus
- 2) ทำการทดลองหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของแต่ละระบบ
- 3) คำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการหลังการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิงแต่ละระบบ
- 4) เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อนและหลังการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของแต่ละระบบอ้างอิง แล้วสรุปผล

3.3.5 การทดลองที่ 4

4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดหลายตำแหน่งด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index

วัตถุประสงค์

หาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดหลายตำแหน่ง โดยใช้ค่า L-Index และหาขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดของบัสนั้นๆ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ หลายบัส จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น

วิธีการทดลอง

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Initial power flow solution)
- 2) หาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow solution) โดยใช้วิธี Newton-Raphson ในการแก้ปัญหาระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น
- 3) เพิ่มโหลดของระบบ แล้วหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จุดถัดไปจนถึงจุดที่ไม่สามารถหาคำตอบให้กับระบบได้ (Critical point หรือ voltage collapse point)
- 4) ตรวจสอบหาบัสที่อ่อนแอที่สุดจากเส้นกราฟที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด ณ จุด Critical point
- 5) ใช้วิธี Separately-optimized เพื่อวิเคราะห์หาขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยลดภาระทางไฟฟ้าได้มากที่สุด
- 6) ใส่ค่ากำลังการผลิตที่หาได้จากข้อ 3 เป็นค่าเริ่มต้นของคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า แล้วทำการทดลองที่ 1 อีกครั้ง เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายเพื่อช่วยลดภาระ ณ บัสที่อ่อนแอที่สุด
- 7) ทำการทดลองที่ 4) – 6) อีกครั้ง เพื่อเพิ่มการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

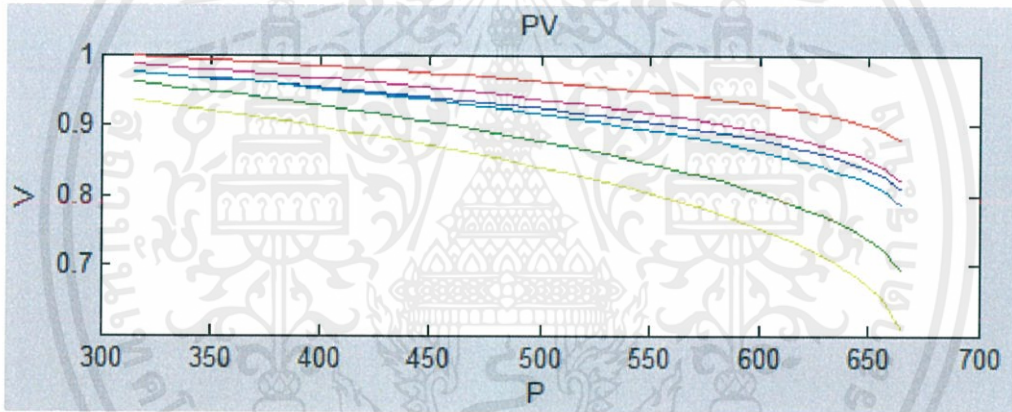
4.1 การทดลองที่ 1

การทดลองนี้มีขึ้นเพื่อหาดำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin ซึ่งแบ่งเป็น 2 การทดลองย่อย ดังนี้

4.1.1 การวิเคราะห์หาดำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

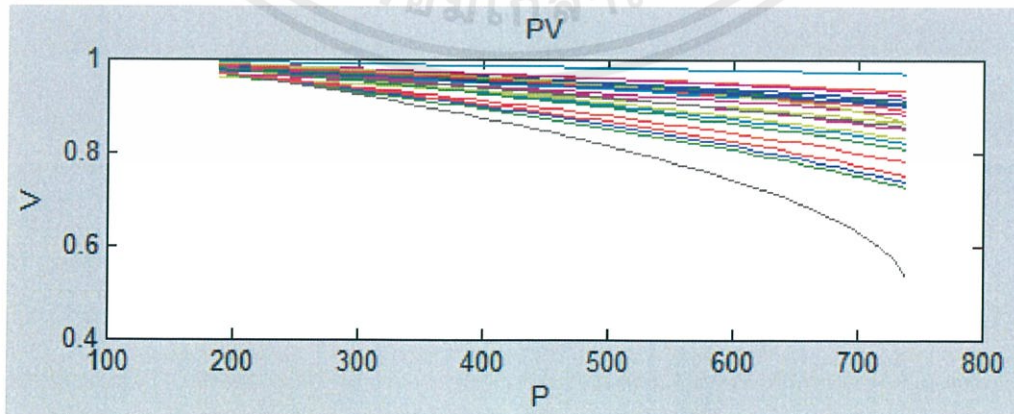
เป็นการทดลองเพื่อหาดำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด หรือตำแหน่งที่มีเสถียรภาพแรงดันน้อยที่สุด โดยพิจารณาจากการเพิ่มภาระทางกำลังไฟฟ้าจนกระทั่งถึงจุดที่เกิดการพังทลายของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และพิจารณาจากเส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าต่ำที่สุด ผลแต่ละระบบอ้างอิง เป็นดังนี้

1) IEEE: Case 9



รูปที่ 4.1 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 9)

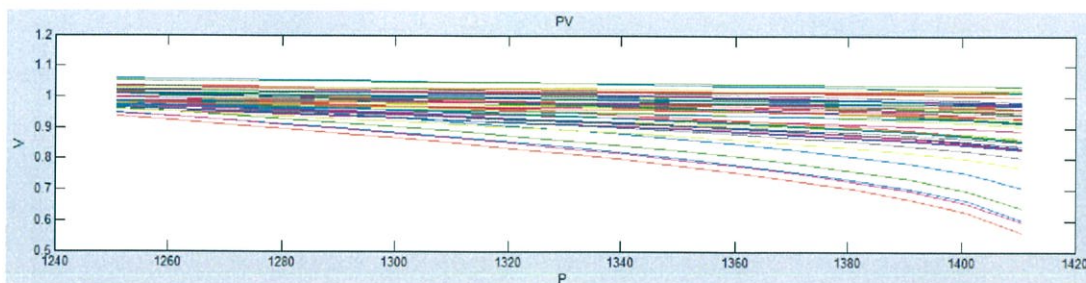
2) IEEE: Case 30



รูปที่ 4.2 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 26)

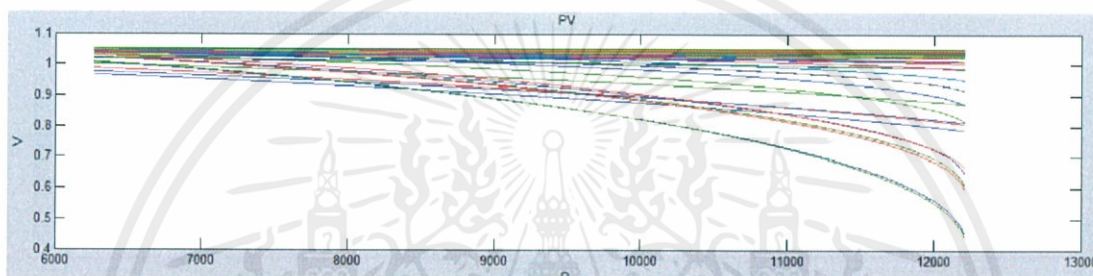
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) IEEE: Case 57



รูปที่ 4.3 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 31)

4) Case Thailand 124 bus

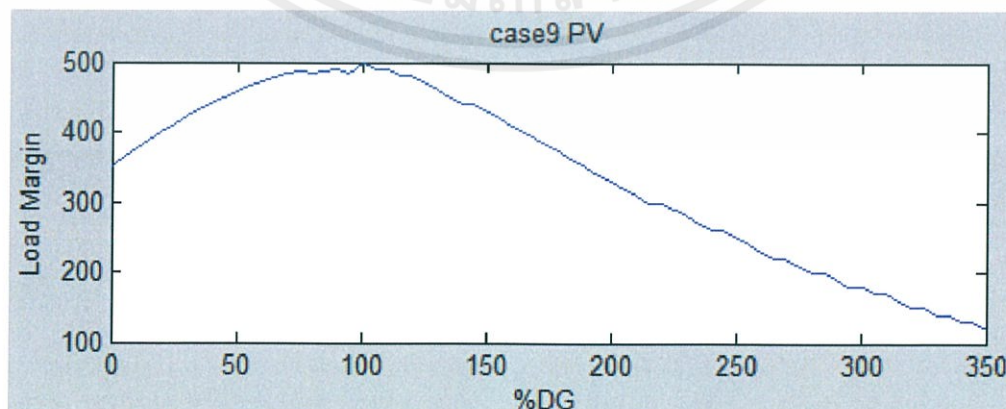


รูปที่ 4.4 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอที่สุด หรือ แรงดันต่ำที่สุด คือ บัส 87)

4.1.2 การวิเคราะห์หาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

เป็นการทดลองเพื่อหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด โดยในเบื้องต้นได้กำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง ซึ่งได้จากการทดลองที่ 1.1 แล้วเพิ่มกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายเพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการผลิตและค่าเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งค่ากำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ ค่าที่ทำให้เสถียรภาพของระบบมีค่าสูงที่สุด โดยผลแต่ละระบบอ้างอิง เป็นดังนี้

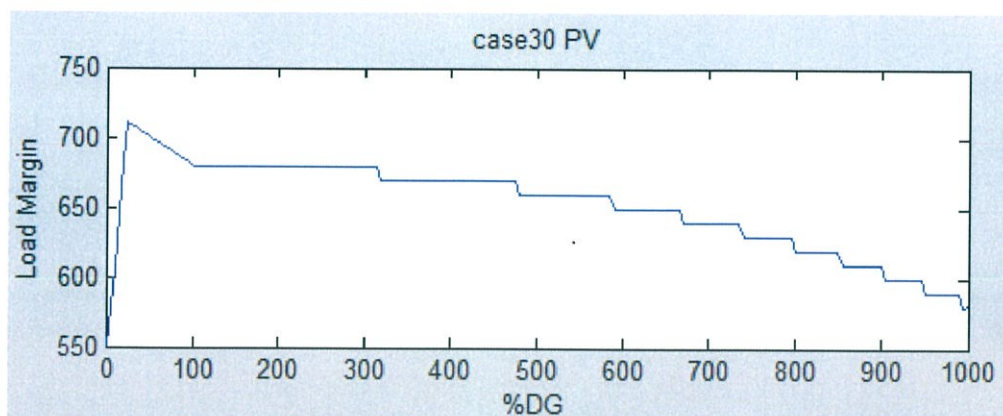
1) IEEE: Case 9



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 9 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุด คือ 125 MW)

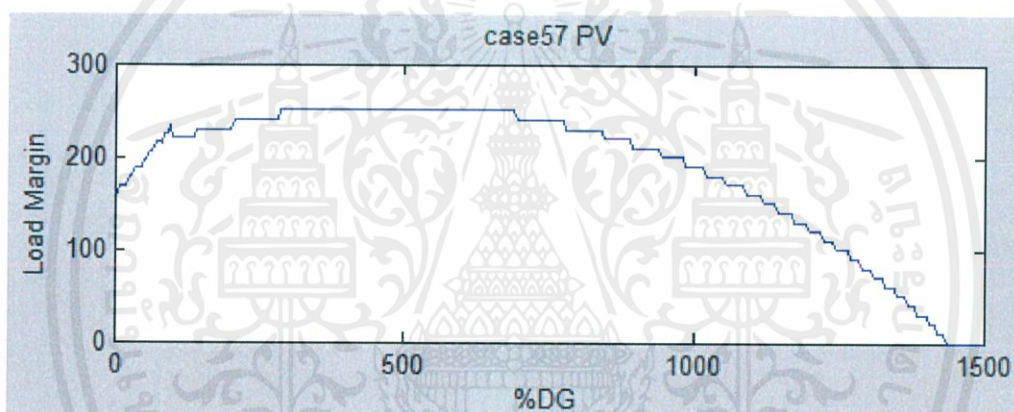
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) IEEE: Case 30



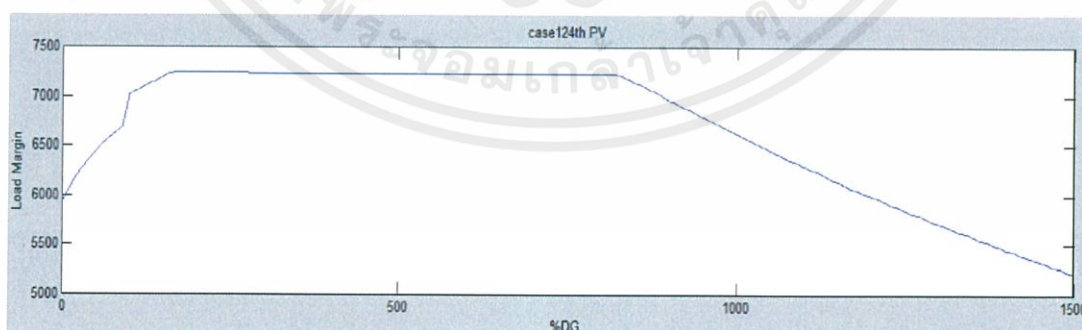
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 26 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุดคือ 0.875 MW)

3) IEEE: Case 57



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 31 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุดคือ 33.93 MW)

4) Case Thailand 124 bus



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ Load margin ณ บัส 87 (ขนาดกำลังการผลิตที่ดีที่สุดคือ 68.651 MW)

การทดลองนี้สามารถสรุปผลของตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายในระบบต่างๆ ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละระบบอ้างอิง ด้วยดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin

ระบบอ้างอิง	ตำแหน่งที่เหมาะสม	ขนาดที่เหมาะสม (%)	ขนาดที่เหมาะสม (MW)
9	9	100	125.00
30	26	25	0.875
57	31	585	33.93
Thailand 124	87	170	68.651

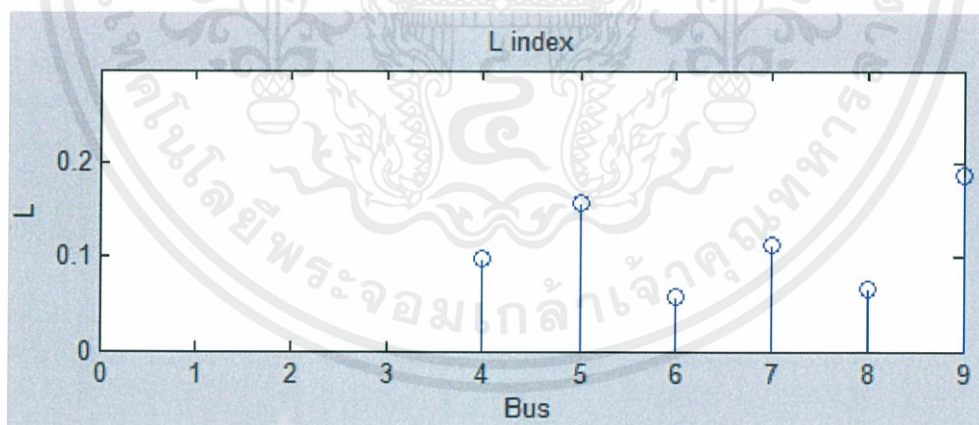
4.2 การทดลองที่ 2

การทดลองนี้เพื่อหาตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดเพื่อติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน คือ L-Index ซึ่งแบ่งเป็น 3 การทดลองย่อย ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

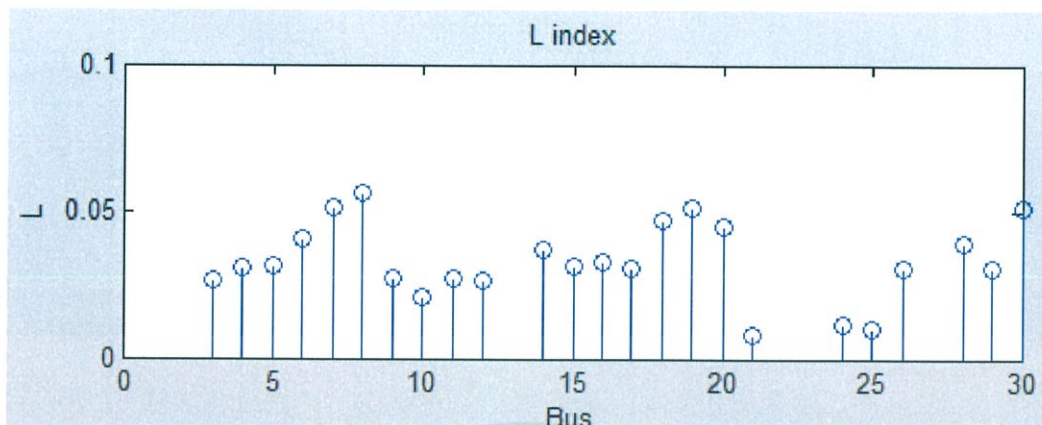
เป็นการทดลองเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด หรือตำแหน่งที่มีเสถียรภาพแรงดันน้อยที่สุด โดยพิจารณาจากค่า L ที่มากที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.32) โดยจะทำการเปรียบเทียบค่า L ของบัส PQ ทั้งหมด ซึ่งผลแต่ละระบบอ้างอิง เป็นดังนี้

1) IEEE: Case 9



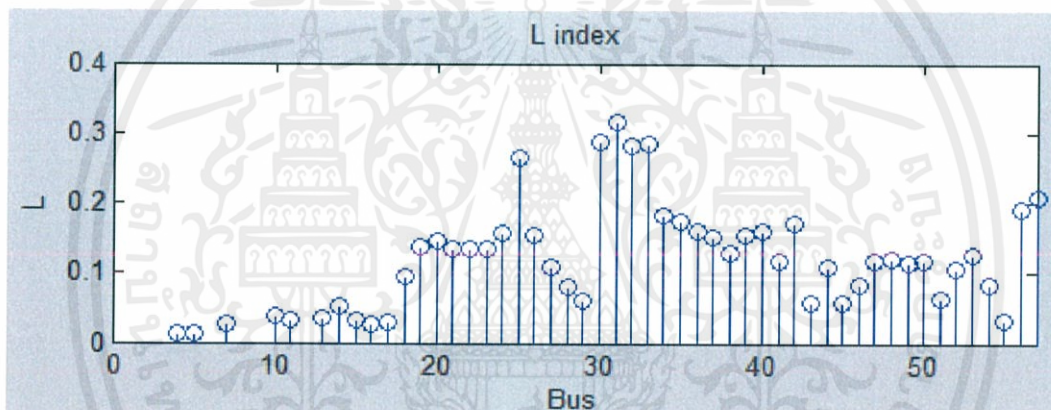
รูปที่ 4.9 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 9)

2) IEEE: Case 30



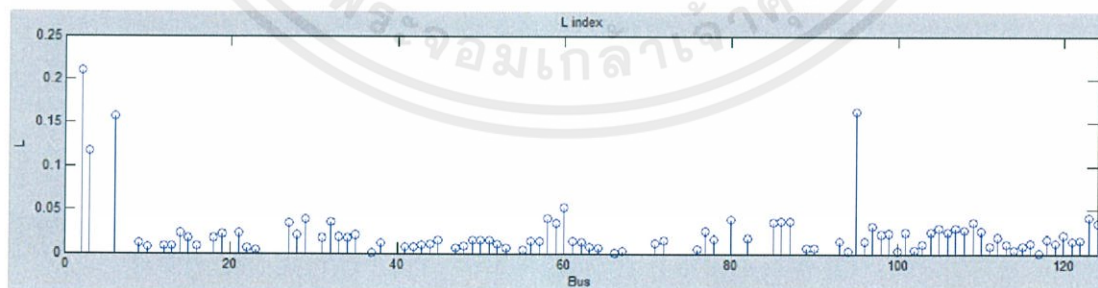
รูปที่ 4.10 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 8)

3) IEEE: Case 57



รูปที่ 4.11 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 31)

4) Case Thailand 124 bus

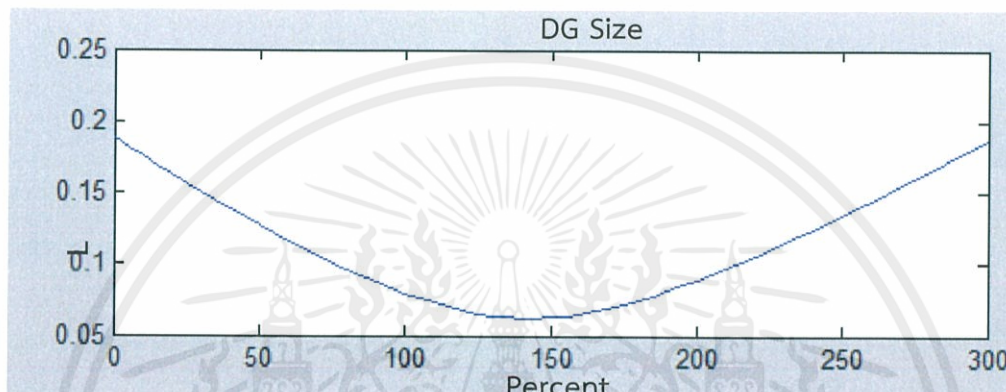


รูปที่ 4.12 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 2)

4.2.2 การวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

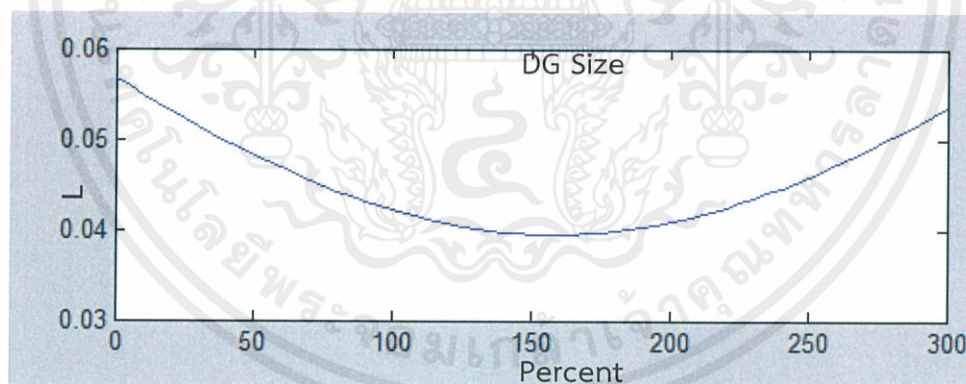
เป็นการทดลองเพื่อหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด โดยในเบื้องต้นได้กำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง ซึ่งได้จากการทดลองที่ 2.1 แล้วเพิ่มกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายเพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการผลิตและค่าเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งค่ากำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ ค่าที่ทำให้เสถียรภาพของระบบมีค่าสูงที่สุด โดยผลแต่ละระบบอ้างอิง เป็นดังนี้

1) IEEE: Case 9



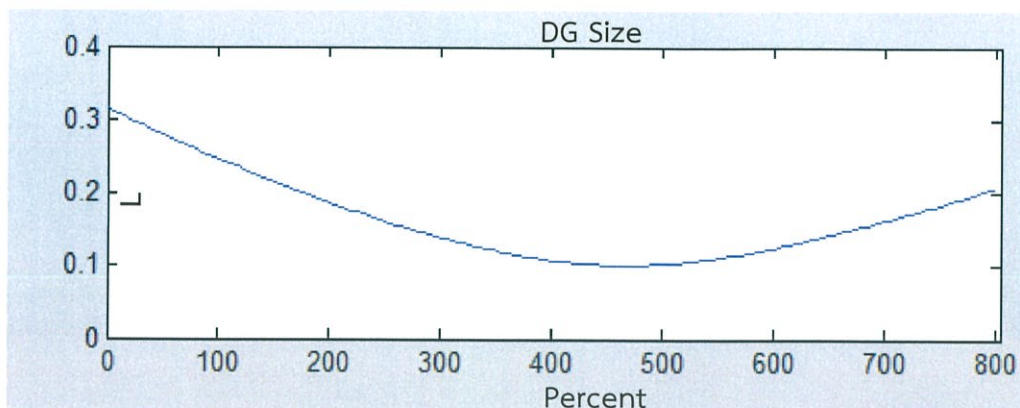
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 9 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 181.25 MW)

2) IEEE: Case 30



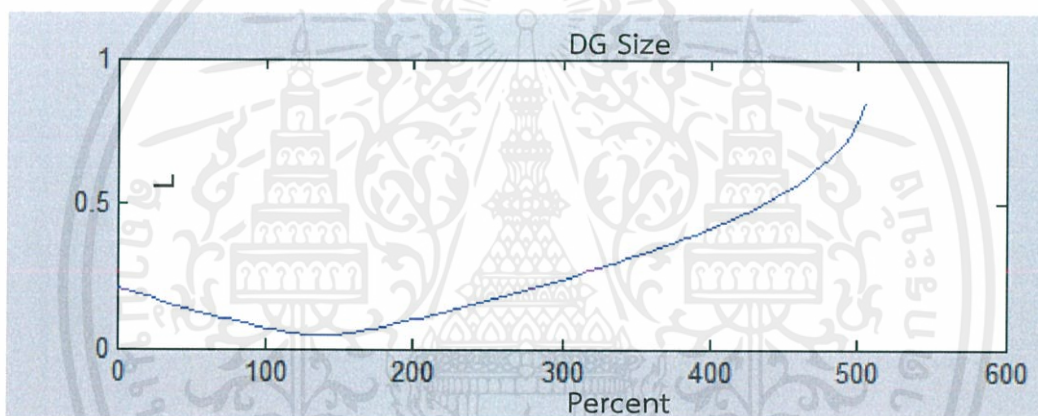
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 8 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 48 MW)

3) IEEE: Case 57



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 31 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 26.97 MW)

4) Case Thailand 124 bus



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 2 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 625.076 MW)

การทดลองนี้สามารถสรุปผลของตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่จะติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ ระบบต่างๆ ได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด ที่หาด้วยค่า L-Index

ระบบอ้างอิง	ตำแหน่งที่เหมาะสม	ขนาดที่เหมาะสม (%)	ขนาดที่เหมาะสม (MW)
9	9	145	181.25
30	8	160	48.00
57	31	465	26.97
Thailand 124	2	135	625.076

4.2.3 การเปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน PV Curve และ L-Index

เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพทั้งสองตัว คือ Load margin และ L-Index โดยตารางเปรียบเทียบผลจากทั้งสองการทดลองจากแต่ละระบบอ้างอิง เป็นดังนี้

4.2.3.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด

1) IEEE: Case 9

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด

ลำดับ	L-Index	ขนาดของ L	Load margin	ขนาดของ V
1	9	0.1748	9	0.6049
2	5	0.1458	5	0.6639
3	7	0.1129	7	0.7767
4	4	0.0899	4	0.7984
5	8	0.0680	8	0.8257
6	6	0.0576	6	0.8682

2) IEEE: Case 30

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด

ลำดับ	L-Index	ขนาดของ L	Load margin	ขนาดของ V
1	8	0.0567	26	0.5309
2	19	0.0515	19	0.7241
3	7	0.0515	18	0.7349
4	30	0.0514	20	0.7499
5	18	0.0474	30	0.7801
6	20	0.0451	29	0.8055

3) IEEE: Case 57

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด

ลำดับ	L-Index	ขนาดของ L	Load margin	ขนาดของ V
1	31	0.3155	31	0.5602
2	30	0.2877	33	0.5948
3	33	0.2841	32	0.6029
4	32	0.2815	30	0.6408
5	25	0.2659	25	0.7055
6	57	0.2078	35	0.8047
7	56	0.1915	57	0.8290

4) Case Thailand 124 bus

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการเรียงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของระบบอ้างอิง Thailand 124 bus โดยเรียงลำดับบัสที่มีเสถียรภาพแรงดันที่น้อยที่สุด

ลำดับ	L-Index	ขนาดของ L	Load margin	ขนาดของ V
1	2	0.2103	87	0.5984
2	6	0.1574	86	0.6107
3	3	0.1174	2	0.7878
4	60	0.0518	6	0.8082
5	58	0.0400	72	0.8139
6	29	0.0393	3	0.8736
7	80	0.0389	71	0.9156

จากตารางแสดงลำดับตำแหน่งที่เหมาะสม สามารถสรุปตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระบบได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงลำดับบัสที่เหมาะสมที่สุดต่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายของแต่ละระบบ

ระบบอ้างอิง	ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของ L-Index	ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของ Load margin
IEEE 9	9	9
IEEE 30	8	26
IEEE 57	31	31
124 (Thailand)	2	87

4.2.3.2 การเปรียบเทียบขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระบบ โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin

ระบบอ้างอิง	ตำแหน่ง	กำลังการผลิตที่ติดตั้ง (MW)	Load margin ก่อนติดตั้ง	Load margin หลังติดตั้ง
IEEE 9	9	125.00	350	500
IEEE 30	26	0.875	550	710
IEEE 57	31	33.93	160	250
Thailand 124	87	68.651	5940	7250

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระบบ โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index

ระบบอ้างอิง	ตำแหน่ง	กำลังการผลิตที่ติดตั้ง (MW)	L ก่อนติดตั้ง	L หลังติดตั้ง
IEEE 9	9	181.25	0.1748	0.0624
IEEE 30	8	48.00	0.0567	0.0395
IEEE 57	31	26.97	0.3155	0.1012
Thailand 124	2	625.076	0.2103	0.0459

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยดัชนีชี้วัด Load margin และ L-Index

ระบบอ้างอิง	เวลาที่ใช้	
	Load margin	L-Index
IEEE 9	23 วินาที	2.2 วินาที
IEEE 30	1 นาที 41 วินาที	2.3 วินาที
IEEE 57	59 วินาที	2.5 วินาที
Thailand 124	24 นาที 10 วินาที	2.9 วินาที

จากตาราง สามารถสรุปได้ว่า ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ Load margin คือ ค่าดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่แท้จริง แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการคำนวณมาก เนื่องจากจำเป็นต้องทำการคำนวณซ้ำด้วย Newton Power Flow ส่วนดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ L-Index ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า แต่ผลที่ได้ อาจไม่เที่ยงตรงเท่าผลการทดลองที่ได้จาก Load margin เนื่องจากค่า L เป็นเพียงแค่ค่าประมาณของดัชนีเสถียรภาพแรงดันเท่านั้น

4.3 การทดลองที่ 3

การทดลองนี้เป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งก่อนและหลังการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่มีขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดลงบนตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบเพิ่มขึ้น โดยตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดนั้นได้จากการทดลองข้างต้น แล้วนำค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่คำนวณได้นั้นมาเปรียบเทียบกัน ในแต่ละระบบ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.11 ตารางการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งก่อนและหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ Load margin

ระบบอ้างอิง	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ		
	ก่อนการติดตั้ง DG (ล้านดอลลาร์/ปี)	หลังการติดตั้ง DG โดย Newton PF (ล้านดอลลาร์/ปี)	หลังการติดตั้ง DG โดย Optimal Newton PF (ล้านดอลลาร์/ปี)
IEEE 9	47.67	26.09	24.28
IEEE 30	5.25	5.22	5.03
IEEE 57	449.94	434.92	353.01
Thailand 124	-	-	-

ตารางที่ 4.12 ตารางการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งก่อนและหลังติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ L-Index

ระบบอ้างอิง	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ		
	ก่อนการติดตั้ง DG (ล้านดอลลาร์/ปี)	หลังการติดตั้ง DG โดย Newton PF (ล้านดอลลาร์/ปี)	หลังการติดตั้ง DG โดย Optimal Newton PF (ล้านดอลลาร์/ปี)
IEEE 9	47.67	19.76	17.61
IEEE 30	5.25	3.62	3.48
IEEE 57	449.94	437.42	355.39
Thailand 124	-	-	-

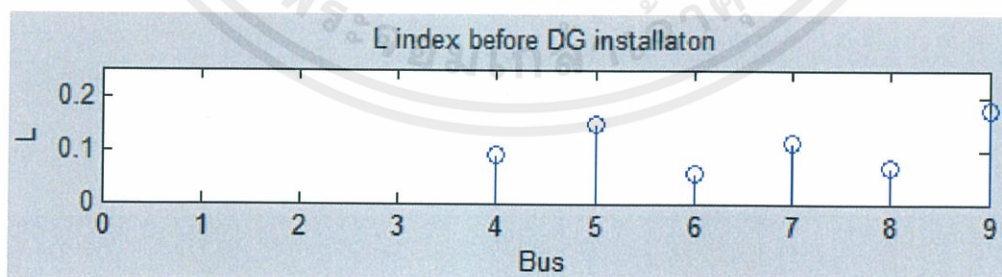
จากตาราง สามารถสรุปได้ว่า การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย นอกจากจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้แล้ว ยังสามารถช่วยลดค่าดำเนินการต่อปีได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ราคาที่คำนวณได้นี้ ยังไม่รวมราคาการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

4.4 การทดลองที่ 4

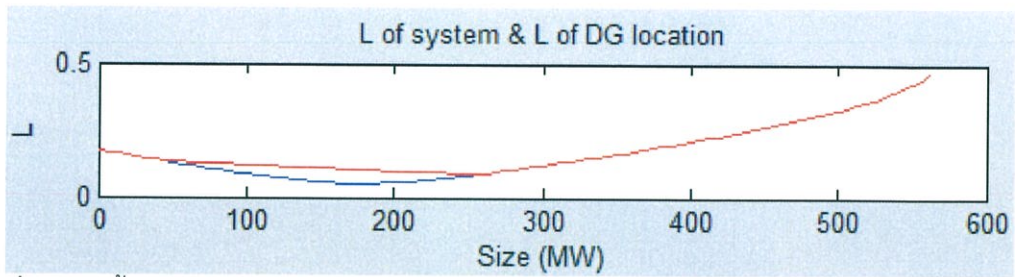
การทดลองนี้เพื่อหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดหลายตำแหน่ง โดยใช้ค่า L-Index และหาขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดของบัสนั้นๆ เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ หลายบัส ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus

1) IEEE: Case 9

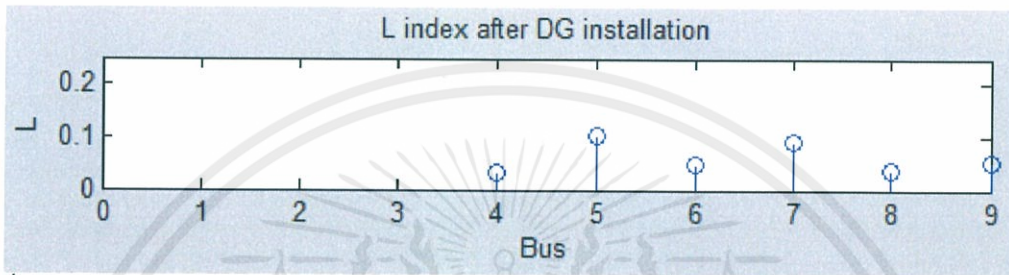
- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 1



รูปที่ 4.17 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 9)

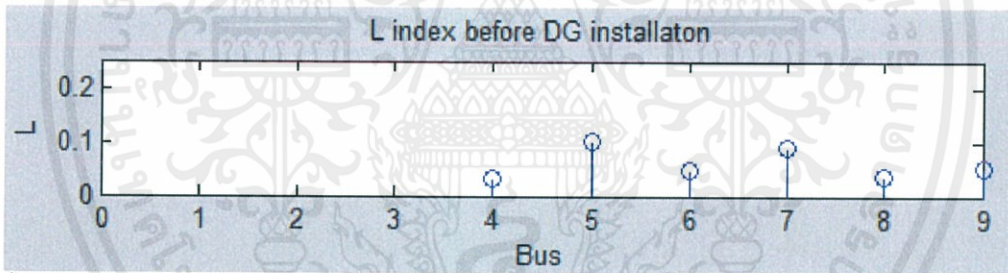


รูปที่ 4.18 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 9 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 175 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

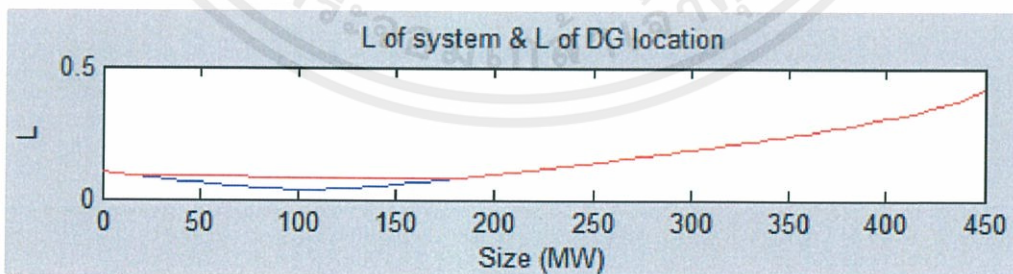


รูปที่ 4.19 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 5)

- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ครั้งที่ 2

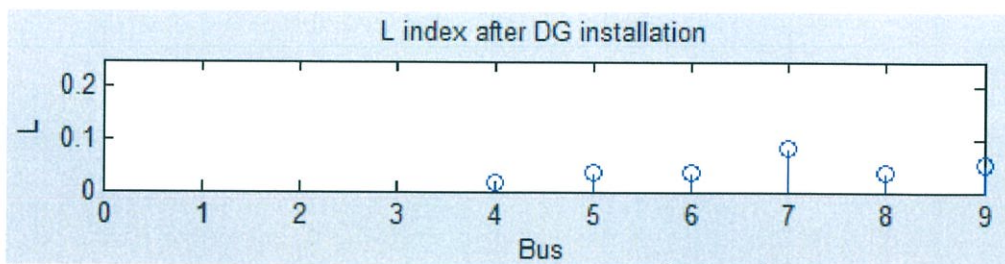


รูปที่ 4.20 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 5)



รูปที่ 4.21 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 5 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 103.5 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 7)

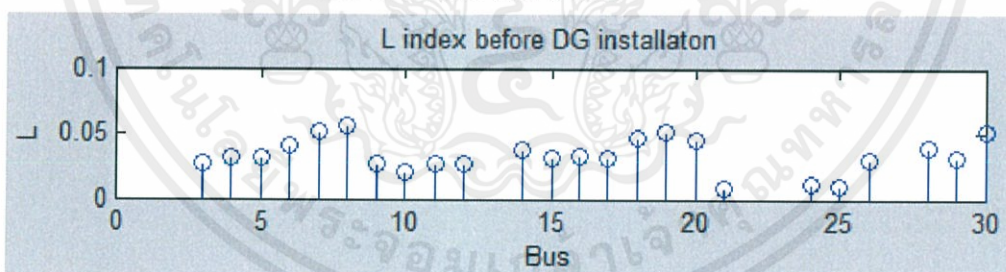
สามารถสรุปผลของตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่จะติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ ระบบ IEEE: Case 9 ได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.13 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ IEEE: Case 9

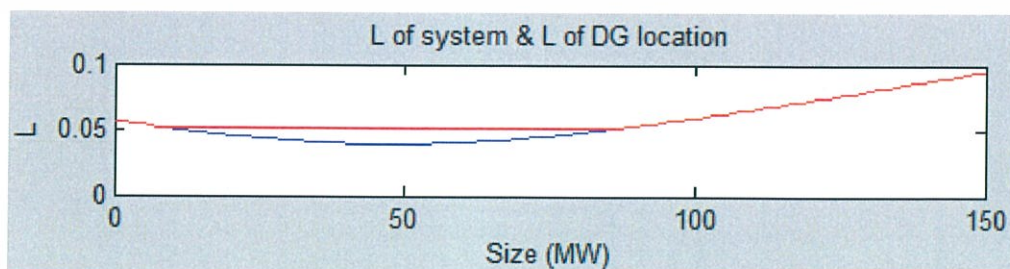
กรณีการติดตั้ง DG	ตำแหน่ง	ขนาดกำลังการผลิต (MW)	L ณ ตำแหน่งติดตั้ง		L ของระบบ	% การพัฒนา
			ก่อน	หลัง		
ก่อนการติดตั้ง	-	-	-	-	0.1748	-
ติดตั้งครั้งที่ 1	9	175	0.1748	0.0522	0.1038	40.62%
ติดตั้งครั้งที่ 2	5	103.5	0.1038	0.0368	0.0832	52.40%

2) IEEE: Case 30

- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 1



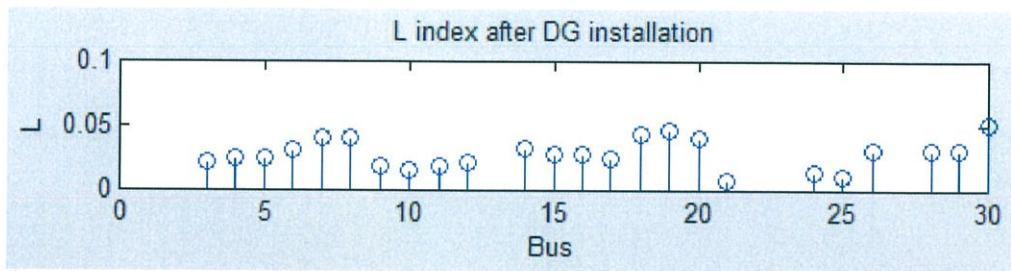
รูปที่ 4.23 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 8)



รูปที่ 4.24 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 8

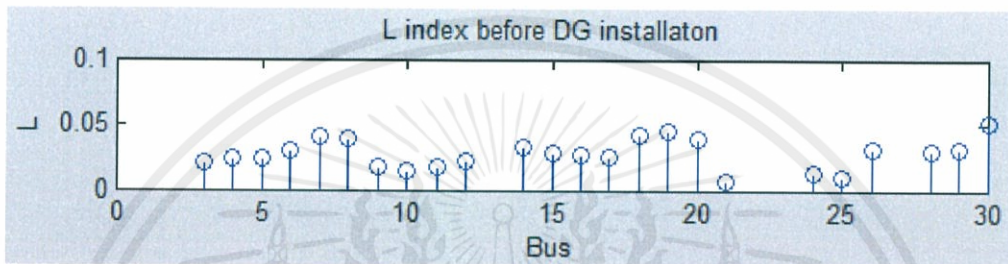
(กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 48 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

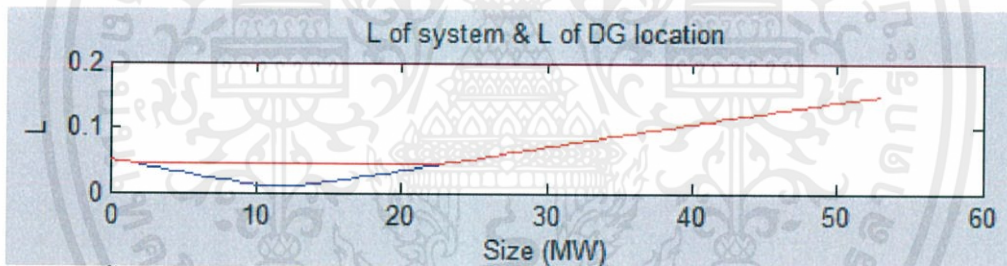


รูปที่ 4.25 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 30)

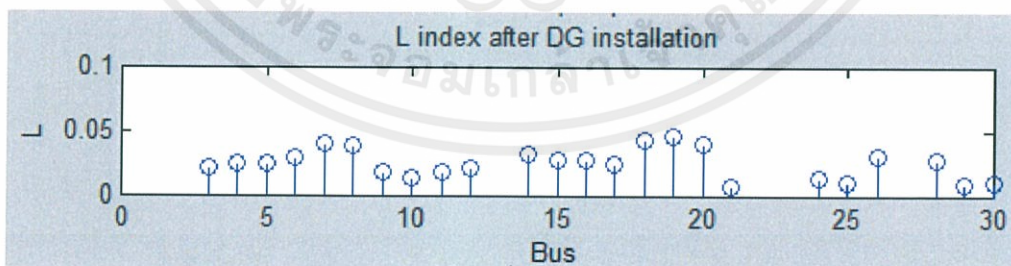
- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 2



รูปที่ 4.26 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 30)

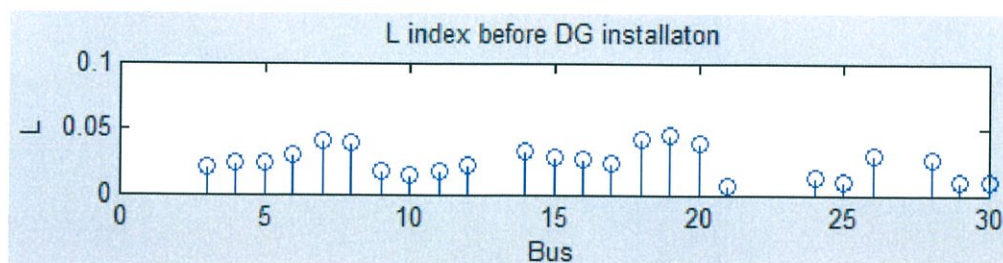


รูปที่ 4.27 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 30 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 11.66 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

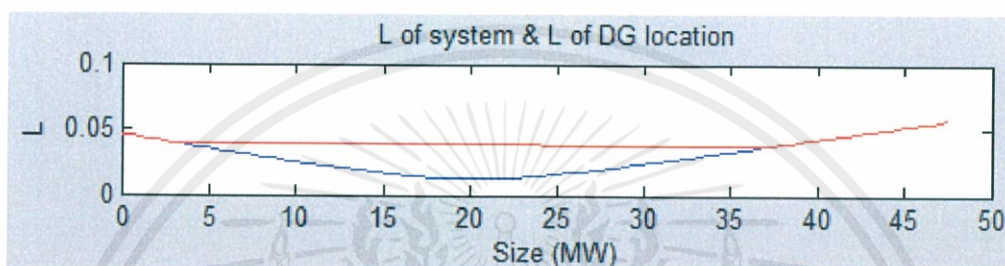


รูปที่ 4.28 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 19)

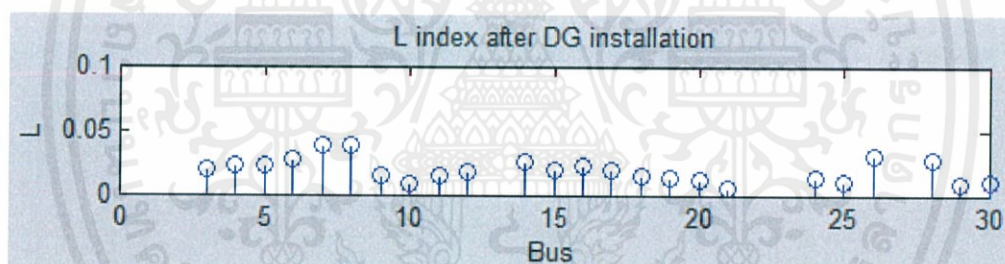
- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 3



รูปที่ 4.29 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 19)



รูปที่ 4.30 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 19 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 19.95 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ



รูปที่ 4.31 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 30 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 7)

สามารถสรุปผลของตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่จะติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ ระบบ IEEE: Case 30 ได้ ดังนี้

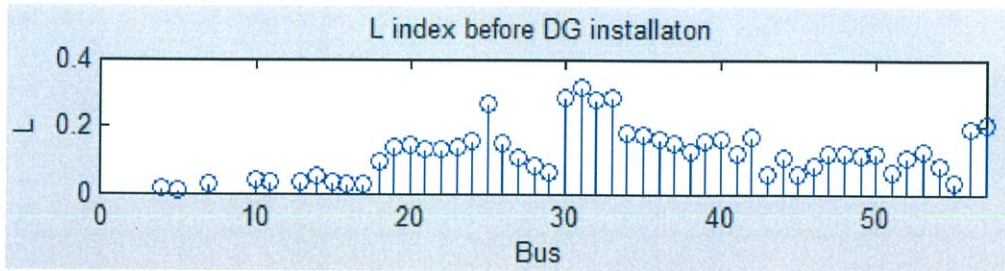
ตารางที่ 4.14 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ IEEE: Case 30

กรณีการติดตั้ง DG	ตำแหน่ง	ขนาดกำลังการผลิต (MW)	L ณ ตำแหน่งติดตั้ง		L ของระบบ	% การพัฒนา
			ก่อน	หลัง		
ก่อนการติดตั้ง	-	-	-	-	0.0567	-
ติดตั้งครั้งที่ 1	8	48	0.0567	0.0395	0.0514	9.35%
ติดตั้งครั้งที่ 2	30	11.66	0.0514	0.0096	0.0458	19.22%
ติดตั้งครั้งที่ 3	19	19.95	0.0458	0.0125	0.0387	31.75%

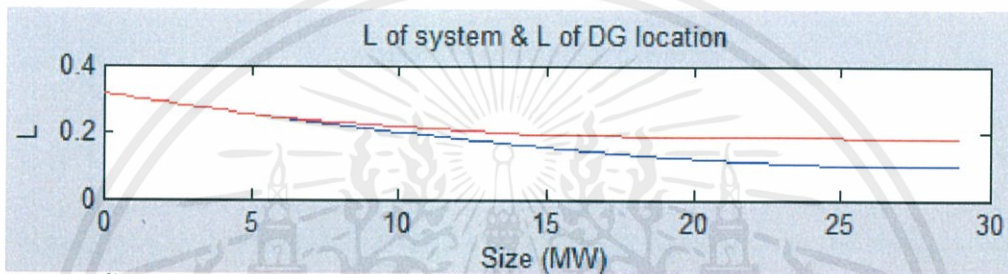
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) IEEE: Case 57

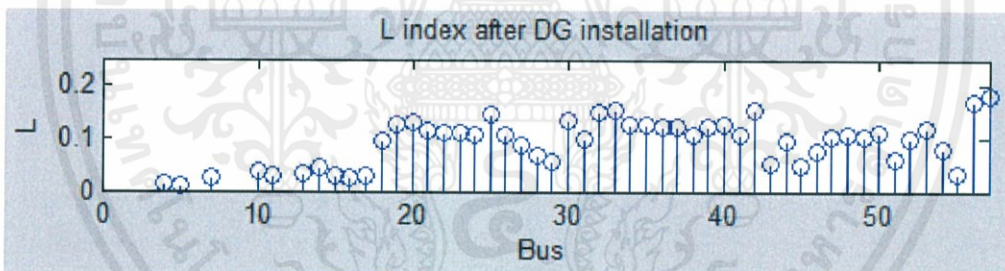
- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 1



รูปที่ 4.32 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 31)

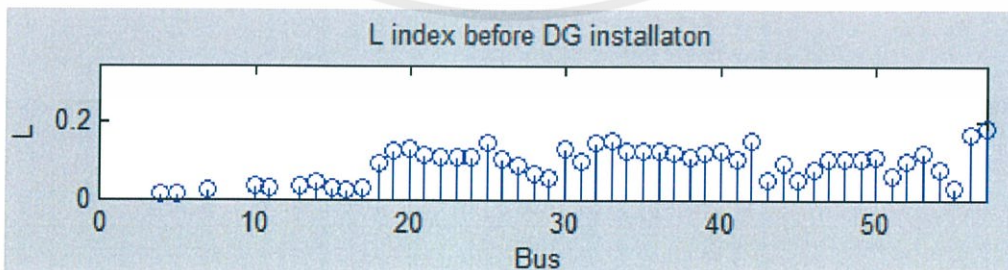


รูปที่ 4.33 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 31 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 26.97 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

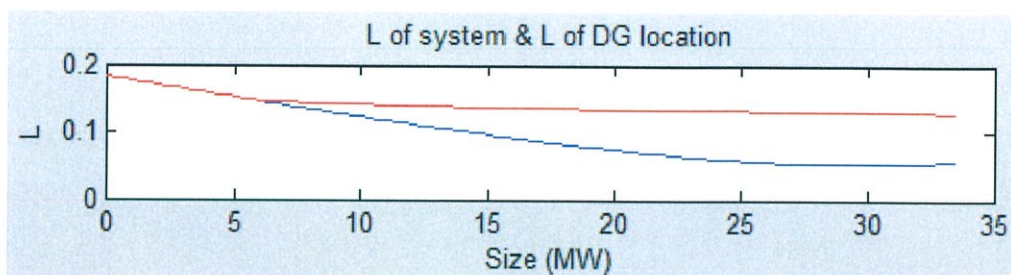


รูปที่ 4.34 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 57)

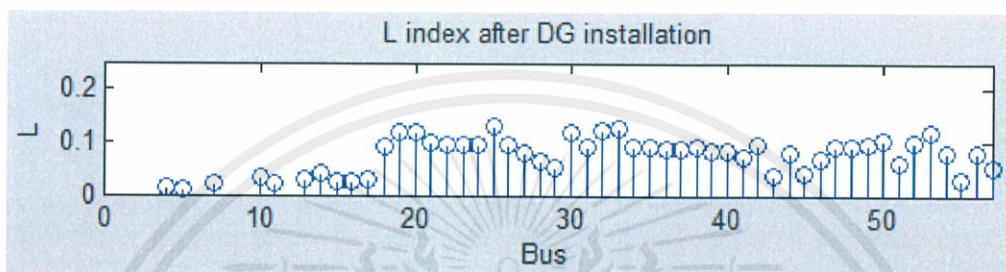
- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 2



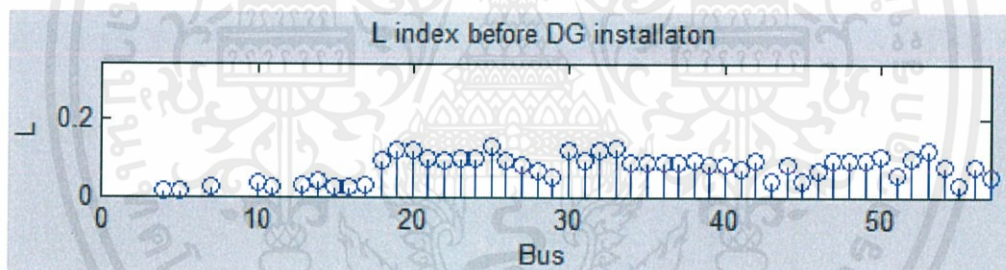
รูปที่ 4.35 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 57)



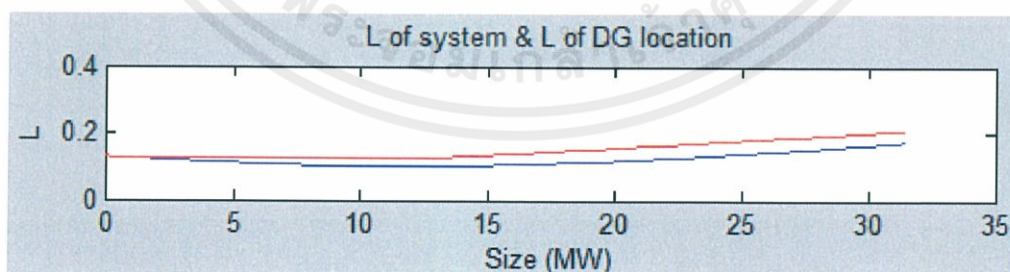
รูปที่ 4.36 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 57 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 29.48 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ



รูปที่ 4.37 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 25) การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 3

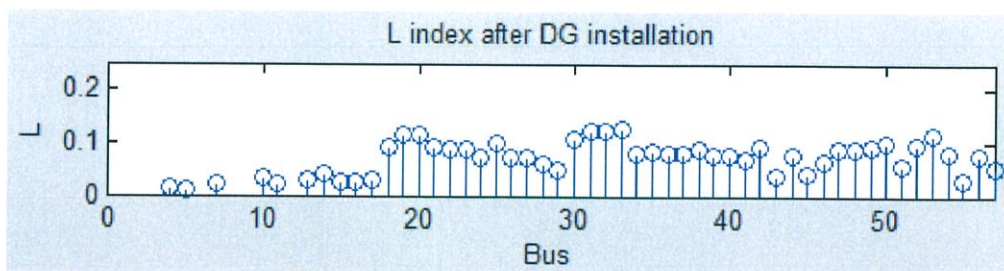


รูปที่ 4.38 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 25)



รูปที่ 4.39 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 25 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 11.34 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 33)

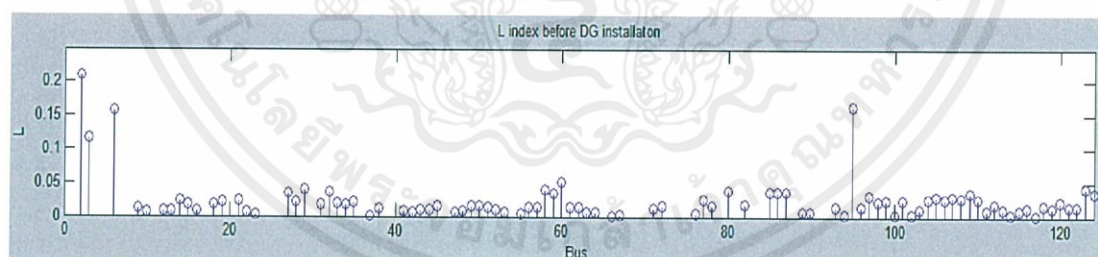
สามารถสรุปผลของตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่จะติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ ระบบ IEEE: Case 57 ได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.15 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ IEEE: Case 57

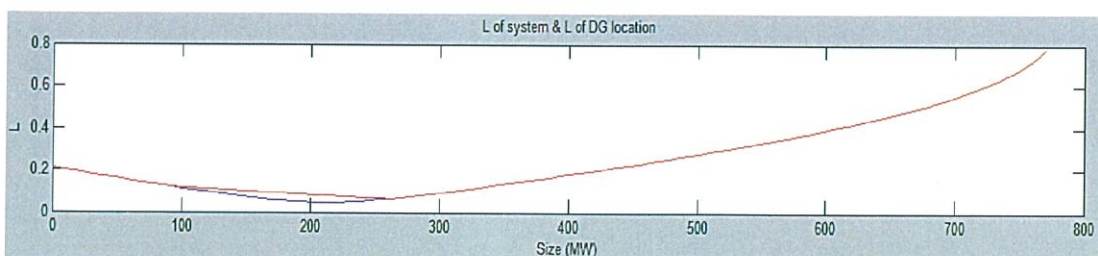
กรณีการติดตั้ง DG	ตำแหน่ง	ขนาดกำลังการผลิต (MW)	L ณ ตำแหน่งติดตั้ง		L ของระบบ	% การพัฒนา
			ก่อน	หลัง		
ก่อนการติดตั้ง	-	-	-	-	0.3155	-
ติดตั้งครั้งที่ 1	31	26.97	0.3155	0.1343	0.1832	41.93%
ติดตั้งครั้งที่ 2	57	29.48	0.1832	0.0527	0.1305	58.64%
ติดตั้งครั้งที่ 3	25	11.34	0.1305	0.1012	0.1263	59.97%

4) Thailand 124 bus

- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 1



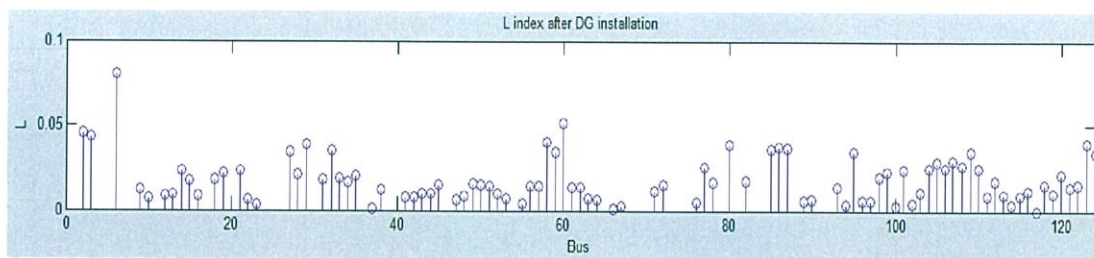
รูปที่ 4.41 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 2)



รูปที่ 4.42 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 2

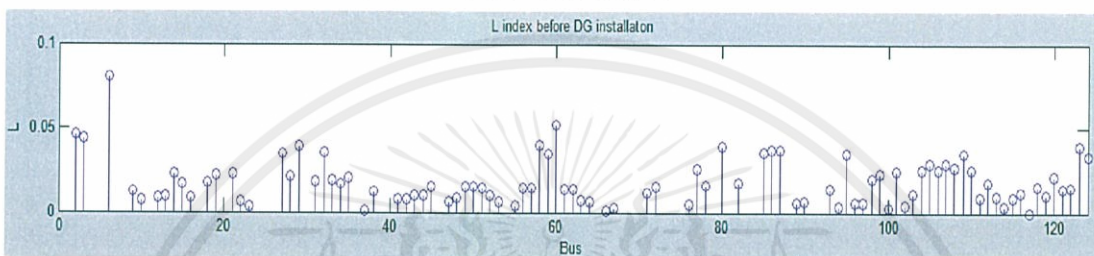
(กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 208.36 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

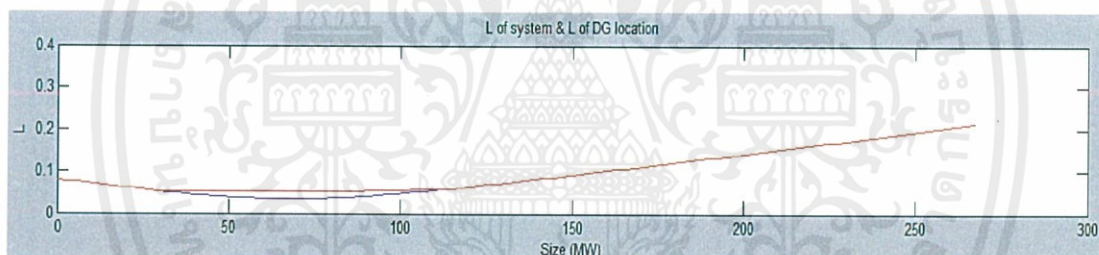


รูปที่ 4.43 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 6)

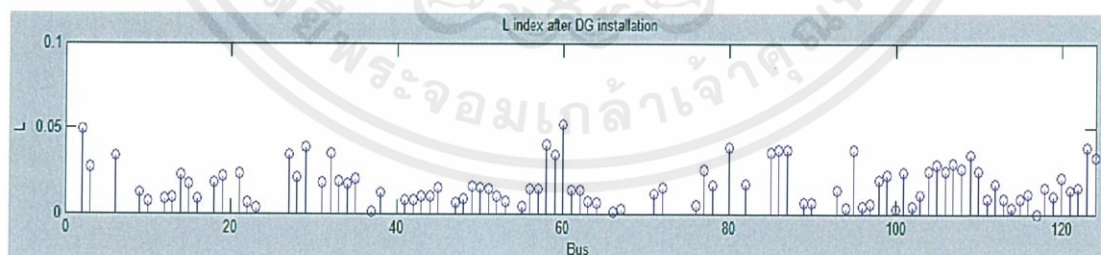
- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 2



รูปที่ 4.44 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 6)

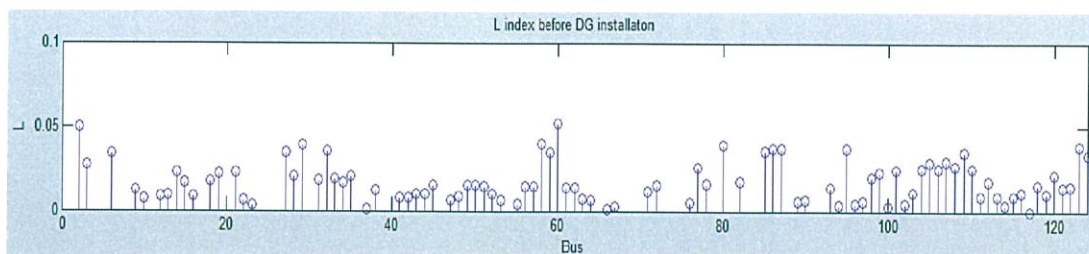


รูปที่ 4.45 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 6 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 66.85 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ

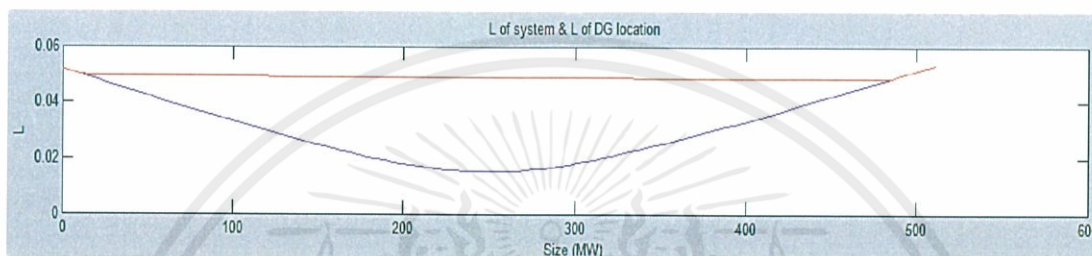


รูปที่ 4.46 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 60)

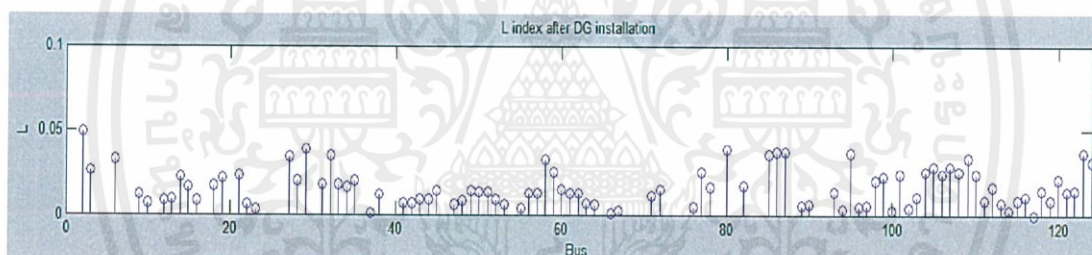
- การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายครั้งที่ 3



รูปที่ 4.47 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันก่อนการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 60)



รูปที่ 4.48 (น้ำเงิน) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตของ DG และ L-Index ณ บัส 6 (กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 250.43 MW) (แดง) กราฟแสดงค่า L ของระบบ



รูปที่ 4.49 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันหลังการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ของแต่ละบัส PQ ในระบบอ้างอิง Thailand 124 bus (บัสที่อ่อนแอหรือมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัส 2)

สามารถสรุปผลของตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่จะติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ ระบบ Thailand 124 bus ได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.16 ตารางสรุปผลการติดตั้ง DG ของระบบ Thailand 124 bus

กรณีการติดตั้ง DG	ตำแหน่ง	ขนาดกำลังการผลิต (MW)	L ณ ตำแหน่งติดตั้ง		L ของระบบ	% การพัฒนา
			ก่อน	หลัง		
ก่อนการติดตั้ง	-	-	-	-	0.2103	-
ติดตั้งครั้งที่ 1	2	208.36	0.2103	0.0459	0.0801	61.91%
ติดตั้งครั้งที่ 2	6	66.85	0.0801	0.0338	0.0519	75.32%
ติดตั้งครั้งที่ 3	60	250.43	0.0519	0.0153	0.0490	76.70%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากแผนพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้า พ.ศ.2558-2579 (PDP 2015) ที่มีโครงการที่จะเชื่อมโยงโครงข่ายระบบสายส่งไฟฟ้าภายในภูมิภาคอาเซียน ซึ่งจะส่งผลต่อการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยโดยรวม เราจึงต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ระบบกำลังไฟฟ้ามีเสถียรภาพของแรงดันและปริมาณโหลดรองรับเพียงพอต่อการใช้งาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าเชิงกระจายโดยใช้วิธีการคัดแยกหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Separately-optimized method) และวิธีการหาค่าดัชนีชี้วัด L (L-Index) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังจำลอง IEEE: Case 9, IEEE: Case 30, IEEE: Case 57 และ Thailand 124 bus

ในส่วนแรกเริ่มจากการพัฒนาโปรแกรมโดยยึดหลักการของวิธีการคัดแยกหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Separately-optimized method) โดยจะใช้ค่า Load margin ที่คำนวณได้จาก PV Curve เป็นค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ และทำการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับระบบไฟฟ้าจำลอง IEEE ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าเชิงกระจาย ในเบื้องต้นพบว่าการหาค่าดัชนีชี้วัด Load margin ในส่วนแรกได้ใช้เวลาในการคำนวณที่ค่อนข้างนาน ทำให้ไม่เหมาะสมในการคำนวณแบบออนไลน์ ในส่วนที่สอง จึงได้ทำการศึกษาการใช้ค่าดัชนีชี้วัดค่าอื่นเพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งได้ทำการเลือกใช้การวัดเสถียรภาพแรงดันด้วยค่าดัชนี L (L-Index) จากการศึกษาพบว่า ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ L-Index ใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า แต่ผลที่ได้อาจไม่เที่ยงตรงเท่าผลการทดลองที่ได้จาก Load margin เนื่องจากค่า L เป็นเพียงแค่ค่าประมาณของดัชนีเสถียรภาพแรงดันเท่านั้น อย่างไรก็ตามวิธีการคัดแยกหาคำตอบผ่าน L-Index ก็สามารถปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน

ผลการทดลองทั้งสองส่วนแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทั้งในส่วนที่ใช้วิธีการ Load margin และส่วนที่ใช้วิธีการ L-Index สามารถปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน แต่ข้อดีของวิธีการ Load margin คือ ความสามารถในการปรับปรุงเสถียรภาพที่สูงกว่าและเที่ยงตรงกว่า ส่วนข้อดีของวิธีการ L-Index คือ ความเร็วในการคำนวณที่สูงกว่า ส่วนการเลือกใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับสถานการณ์และข้อจำกัดในด้านเวลาการคำนวณ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) พัฒนาโปรแกรมให้คำตอบของตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สามารถติดตั้งระบบไฟฟ้าเชิงกระจายได้ เช่น ภูมิประเทศ ความหนาแน่นของประชากร ราคา และประสิทธิภาพ
- 2) เพิ่มวิธีการอื่นที่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันได้ทั้งความถูกต้องแม่นยำและความรวดเร็วในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด



บรรณานุกรม

- [1] กลุ่มบริการและเผยแพร่ข้อมูล สำนักสถิติพยากรณ์. สถิติผู้ใช้ไฟฟ้าและการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า จำแนกตามประเภทผู้ใช้ พ.ศ. 2549 - 2558. สืบค้นจาก <http://service.nso.go.th/nso/web/statseries/statseries18.html>
- [2] Masoud Esmaili, Esmail Chaktan Firozjaee, Heidar Ali Shayanfar, Mulukuta S.Sarma. Applied Energy, 2016. สืบค้นจาก <https://drive.google.com/file/d/0B-ESVjZvTKseSnFfSDVzMUF0Vm8/view>
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 30 มิถุนายน 2558. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579 (PDP2015). สืบค้นจาก <http://www.eepmekong.org/Index.php/resources/country-reports/thailand/217-thailand-power-development-plan-2015-2036-full-text-in-thai/file>
- [4] Virginia Tech's Consortium on Energy Restructuring. Distributed Generation Educational Module. 2007. สืบค้นจาก <http://www.dg.history.vt.edu/Index.html>
- [5] J.Duncan Glover, Mulukuta S.Sarma, Thomas J.Overbye. Power system analysis and design, 5th Edition. Cengage Learning, 2012.
- [6] P. Kessel & H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System". IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 1, No.3, 1986, pp. 346-353
- [7] D. Devaraj, J. Preetha Roselyn. Genetic Algorithm based reactive power dispatch for voltage stability improvement. Electrical Power and Energy Systems. สืบค้นจาก <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061510001183>
- [8] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez & others. MATPOWER: A MATLAB Power System Simulation Package. สืบค้นจาก <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าประเทศไทย เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุด

Optimal Placement of Distributed Generation Regarding Voltage Stability for Thailand Power Grid

เทียนชัย พาเทศ^[1] พิษขริรี อภินันท์ธนากร^[1] และวิศวะ ตะพานวงศ์^[1]

^[1]ภาควิชาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ โทร 10520 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ ซอยฉลองกรุง 1 10-2739-2478

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์และการพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายด้วยขั้นตอนวิธีการคัดแยกหาคำตอบ โดยอาศัยข้อมูลการผลิตไฟฟ้า การส่งกำลังไฟฟ้า และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบในการระบุตำแหน่งบัสและปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย รวมทั้งทำการศึกษาผลกระทบเชิงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ โดยวิธีแรกใช้ค่าความสามารถในการรองรับภาระทางไฟฟ้า (Load margin) ที่คำนวณได้จากกราฟของ P-V curve เป็นตัวชี้วัดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการของ Newton-Raphson และวิธีที่สองใช้การหาค่าชี้วัด L (L-Index) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตำแหน่งและปริมาณการติดตั้งของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ผลการทดลองจากระบบจำลองสายส่งแรงสูงของ IEEE และของประเทศไทยพบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถพัฒนาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายได้ และให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า, ขั้นตอนวิธีการคัดแยกหาคำตอบ, ตัวชี้วัดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า, แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย

ABSTRACT

This project presents a numerical study and an optimization scheme for optimal placement of distributed generation units (DG) by using Separately-optimized Method and voltage stability indices. Based on the generation, transmission and distribution data of Thailand power grid, we can determine the optimal locations for distributed generation units' installation, compute optimal generation levels for the DG units, and also analyze the impact on voltage stability (VS) of power system. We can obtain voltage stability indices based on the Load margin values from PV curves in the first experiment. L-indices are employed in the second experiment in order to increase the computational speed and make our program suitable for online computing. The simulation results from IEEE

test systems and Thailand power system show that our developed program can reliably and effectively improve the voltage stability of grid-connected DG power systems.

Keyword: Voltage Stability, the separately-optimized Method, voltage stability Index, Distributed Generation

1. บทนำ

จากข้อมูลของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย (Distributed Generator) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ ทว่าการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายแต่ละพื้นที่นั้นก็มีผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน ทำให้ต้องมีกรวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเพื่อการออกแบบและติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายได้อย่างเหมาะสมที่สุด

ในการศึกษาและการจำลองระบบไฟฟ้า ได้นำซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ MATLAB มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อแสดงถึงการไหลเวียนของกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัส (bus) รวมถึงความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าหลังจากเกิดเหตุการณ์รบกวนต่อระบบ หากบัสใดได้รับผลกระทบจากการรบกวนมากที่สุด ก็จะเลือกติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่ตำแหน่งนั้น เพื่อเป็นการชดเชยภาระทางไฟฟ้าให้แก่บัสและช่วยในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

2. การทดลอง

2.1 ทฤษฎี

1) การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถของระบบในการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสให้สามารถทำงานได้อย่างปกติหลังจากที่เกิดการรบกวนต่อระบบ

PV Curve คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางไฟฟ้าในหน่วยวัตต์ (Watt) เทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าของบัส

การสร้างกราฟ PV Curve สามารถทำได้โดยการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าจนกว่าระดับแรงดันจะถึงจุดวิกฤติ (Critical Point) ซึ่งเป็นจุดที่แสดงถึงขอบเขตเสถียรภาพของระบบในเชิงภาระทางไฟฟ้า (Load margin) ที่ระบบสามารถรองรับได้สูงสุด ณ ขณะนั้น

PV Curve ใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า ขอบเขตเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าในเชิงภาวะทางไฟฟ้า (Load margin) พิจารณาได้จากกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดพังทลาย (Voltage collapse) ของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งก็คือจุดวิกฤตที่ระบบไฟฟ้าสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดันจนไม่สามารถดำเนินการได้

2) การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันด้วยวิธีการ L-Index

เป็นวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าวิธีหนึ่ง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังถูกต้องเชื่อถือได้

ค่า L คือปริมาณการวัดสำหรับการประมาณเสถียรภาพของระบบ ซึ่งมีค่าระหว่างศูนย์ (ระบบไม่มีภาวะทางไฟฟ้า) กับหนึ่ง (เกิดการพังทลายของแรงดัน) หรือ $(0 \leq L \leq 1)$

การคำนวณค่า L ในระบบไฟฟ้า

ในการพิจารณาระบบที่มีบัสจำนวน N และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน N_G สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ I_G, I_L และ V_G, V_L แทน กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสของภาระทางไฟฟ้าจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (2)$$

และ $F_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}] \quad (3)$

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{N_G} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \angle \theta_{ji} + \delta_i - \delta_j \right| \quad (4)$$

เมื่อ i, j คือ ตำแหน่งบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและภาระไฟฟ้า

V_i, V_j คือขนาดแรงดันที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและภาระไฟฟ้า

δ_i, δ_j คือ มุมระหว่างเฟสของแรงดันบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ภาระไฟฟ้าตามลำดับ

θ_{ji} คือ มุมเฟสในรูปของเมทริกซ์ F_{ji}

ในการพิจารณาค่า L จะพิจารณาจากบัส N มีค่า L สูงสุดเนื่องจากเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดที่จะเกิดภาวะพังทลายของแรงดันได้

$$L = \text{MAX}_{j \in L} [L_j] \quad (5)$$

3) วิธีการตัดแยกค่าตอบ (Separately-optimize method)

เป็นวิธีที่ใช้หาสถานที่ติดตั้งและขนาดกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้อัลกอริทึมในการหาค่าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจายที่บัส i เมื่อฟังก์ชัน F_i คือค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชัน P_{DGi} โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชัน P_{DGi} จากค่าที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ไปยังค่าที่มากที่สุด เพื่อให้ค่าของฟังก์ชัน P_{DGi} เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่แก้ปัญหาจะทำให้ฟังก์ชัน F_i มีขนาดใหญ่มากที่สุด โดยที่

$$F_i = \sum_{i=1}^n S_{L,i} - \sum_{i=1}^n S_L$$

ข้อจำกัด : $S_g - S_L - S(v, \theta) = 0 \quad (6)$

$$P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \quad (7)$$

$$S(v, \theta) - S_{\max} \leq 0 \quad (8)$$

F_i คือ ฟังก์ชันของค่าเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ (V)

S_g คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MVA)

S_L คือ เป็นค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด (MVA)

$S_{L,i}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเมื่อรับสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (MVA)

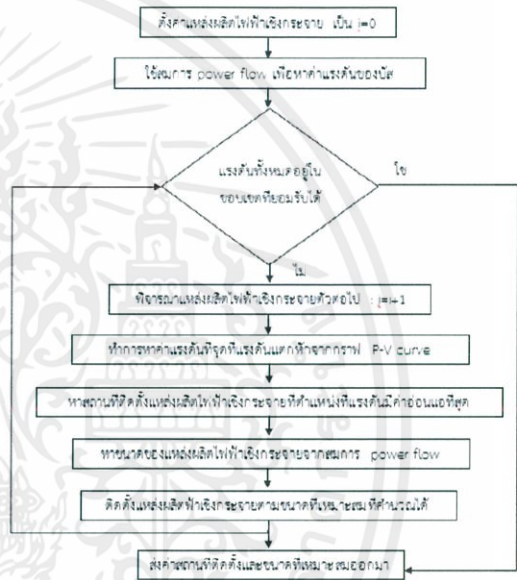
$S(v, \theta)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ (MVA)

$P_{g,i}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

(6) คือ สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ

(7) คือ ปริมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าในช่วงการผลิต

(8) คือ การกำหนดกำลังไฟฟ้าไม่ให้เกินขอบเขต



รูปที่ 1 แผนผังโปรแกรมของวิธีการตัดแยกค่าตอบ

2.2 การทดลอง

การทดลองที่ 1

1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน Load margin วัตถุประสงค์ หาดำเนินการบัสที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ค่า Load margin

1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่า Load margin

วัตถุประสงค์ หาขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยใช้ค่า Load margin

การทดลองที่ 2

2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index

วัตถุประสงค์ หาค่าตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าเชิงกระจาย โดยใช้ค่า L-Index

2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาค่าการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดด้วยตัวชี้วัดเสถียรภาพแรงดัน L-Index

วัตถุประสงค์ หาขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยใช้ค่า L-Index

2.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าด้วยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันทั้งสองค่า

วัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันทั้งสองค่าคือ L-Index และ Load margin

การทดลองที่ 3

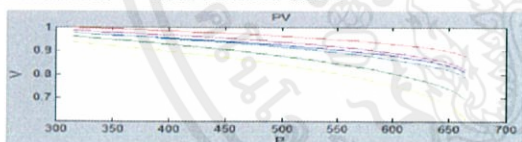
วัตถุประสงค์ วิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าเชิงกระจาย

การทดลองที่ 4

วัตถุประสงค์ หาค่าตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดหลายตำแหน่ง โดยใช้ค่า L-Index และหาขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าเชิงกระจายที่เหมาะสมที่สุดของบัสนั้นๆ ในระบบอ้างอิง IEEE: Case 9, Case 30, Case 57, และ Case Thailand 124 bus เพื่อการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงกระจาย ณ หลายบัส จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น

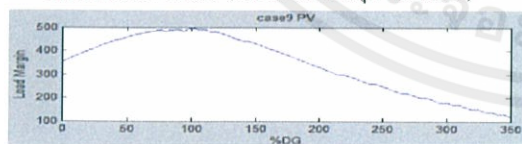
3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ 1 <ตัวอย่าง: IEEE: Case 9>



รูปที่ 2 กราฟ PV Curve แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบ

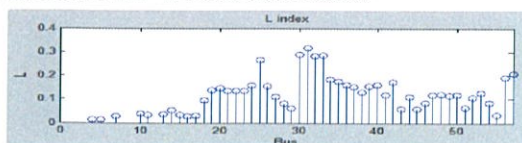
อ้างอิง IEEE: Case 9 (บัสที่อ่อนแอที่สุด คือ Bus 9)



รูปที่ 3 กราฟแสดงขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสม ณ บัส 9

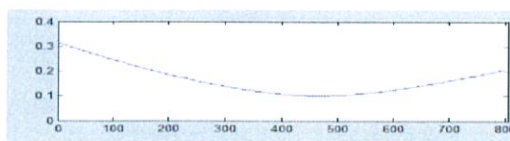
(กำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด คือ 125 MW)

ผลการทดลองที่ 2 <ตัวอย่าง: IEEE: Case 57>



รูปที่ 4 กราฟ L-Index แสดงเสถียรภาพแรงดันของแต่ละบัสในระบบอ้างอิง

IEEE: Case 57 (บัสที่อ่อนแอที่สุด คือ Bus 31)



รูปที่ 5 กราฟขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสม ณ บัส 31

(ขนาดที่เหมาะสมที่สุด คือ 26.97 MW)

ตารางที่ 1 สรุปตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุด

ระบบอ้างอิง	Load margin		L-Index	
	ตำแหน่ง	กำลังการผลิต (MW)	ตำแหน่ง	กำลังการผลิต (MW)
IEEE 9	9	125.00	9	181.25
IEEE 30	26	0.875	8	48.00
IEEE 57	31	33.93	31	26.97
Thailand	87	68.651	2	625.076

ผลการทดลองที่ 3

ตารางที่ 2 ตารางการเปรียบเทียบค่าดำเนินการทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DG

โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ Load margin

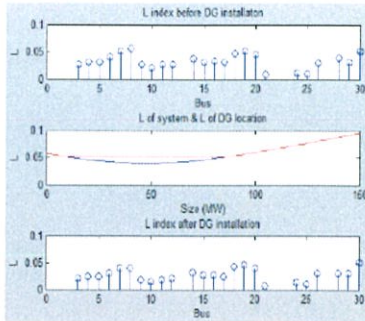
ระบบอ้างอิง	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการติดตั้ง DG (ล้านดอลลาร์/ปี)		
	ก่อน	หลัง ด้วยวิธี Newton PF	หลัง ด้วยวิธี Optimal Newton PF
IEEE 9	47.67	26.09	24.28
IEEE 30	5.25	5.22	5.03
IEEE 57	449.94	434.92	353.01
Thailand	-	-	-

ตารางที่ 3 ตารางการเปรียบเทียบค่าดำเนินการทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DG

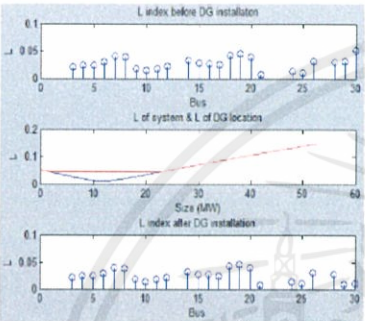
โดยใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ L-Index

ระบบอ้างอิง	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการติดตั้ง DG (ล้านดอลลาร์/ปี)		
	ก่อน	หลัง ด้วยวิธี Newton PF	หลัง ด้วยวิธี Optimal Newton PF
IEEE 9	47.67	19.76	17.61
IEEE 30	5.25	3.62	3.48
IEEE 57	449.94	437.42	355.39
Thailand	-	-	-

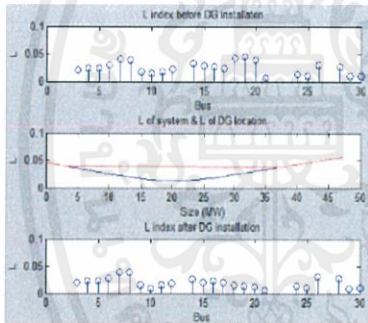
ผลการทดลองที่ 4



รูปที่ 6 กราฟแสดง VS ในการติดตั้ง DG ครั้งที่ 1 ณ บัส 8



รูปที่ 7 กราฟแสดง VS ในการติดตั้ง DG ครั้งที่ 2 ณ บัส 30



รูปที่ 8 กราฟแสดง VS ในการติดตั้ง DG ครั้งที่ 3 ณ บัส 19

ตารางที่ 4 สรุปตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดเมื่อติดตั้งหลายบัส

ระบบอ้างอิง	ตำแหน่ง	กำลังการผลิต (MW)	L ของระบบ		% การพัฒนา
			ก่อน	หลัง	
IEEE 9	9, 5	175, 104	0.1748	0.0832	52.40%
IEEE 30	8, 30, 19	48, 12, 20	0.0567	0.0387	31.75%
IEEE 57	31, 57, 25	27, 30, 11	0.3155	0.1263	59.97%
Thailand	2, 6, 60	208, 67, 250	0.2103	0.0490	76.7%

4. สรุป

ปฏิญานพนธ์ฉบับนี้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าเชิงกระจายด้วยวิธีการ Separately-optimized method เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังจำลอง IEEE: Case 9, IEEE: Case 30, IEEE: Case 57 และ Thailand 124 bus ร่วมกับตัวชี้วัดเสถียรภาพ

แรงดันไฟฟ้า โดยในส่วนตัวแรก ใช้ค่า Load margin ที่คำนวณได้จาก PV Curve ในส่วนที่สอง ใช้การวัดเสถียรภาพแรงดันด้วยค่าดัชนี L (L-Index) ผลการทดลองทั้งสองส่วนแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน แต่ข้อดีของวิธีการ Load margin คือ สามารถปรับปรุงเสถียรภาพที่สูงกว่าและเที่ยงตรงกว่า ส่วนข้อดีของวิธีการ L-Index คือ ความเร็วในการคำนวณที่สูงกว่า ส่วนการเลือกใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับสถานการณ์และความเหมาะสมในด้านเวลาการคำนวณ

5. อ้างอิง

[1] Ray D. Zimmerman, & others. MATPOWER: A MATLAB Power System Simulation Package. ๖1ก <http://www.pserc.com.ell.edu/matpower>
 [2] J.Duncan Glover, Mulukuta S.Sarma, Thomas J.Overbye. Power system analysis and design, 5th Edition. Cengage Learning, 2012.
 [3] P. Kessel & H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System". IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 1, No.3, 1986, pp. 346-353

ประวัติผู้เขียนบทความ

	นายเทียนชัย พนทศ 56010491 เกิดวันที่ 3 ธันวาคม 2537 โทรศัพท์ 091-0109846 E-mail : phenomenon_topz@hotmail.com
	นางสาวพิชชรีย์ อภินันท์ธนากร 56010849 เกิดวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2538 โทรศัพท์ 081-5649744 E-mail : pitcharee.a@gmail.com
	นายวิศวะ ตะพานวงศ์ 56011151 เกิดวันที่ 24 พฤษภาคม 2538 โทรศัพท์ 084-1292082 E-mail : god_blade@hotmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 9: ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลแต่ละบัส

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		ขนาด (p.u.)	แรงดันบัส		ชนิดบัสเซปแทนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)		มุมเฟส (องศา)	V_{max} (p.u.)			V_{min} (p.u.)	
1	Slack Bus	0	0	1	0	0	0	345	1.1	0.9
2	Generator	0	0	1	0	0	0	345	1.1	0.9
3	Generator	0	0	1	0	0	0	345	1.1	0.9
4	Load Bus	0	0	1	0	0	0	345	1.1	0.9
5	Load Bus	90	30	1	0	0	0	345	1.1	0.9
6	Load Bus	0	0	1	0	0	0	345	1.1	0.9
7	Load Bus	100	35	1	0	0	0	345	1.1	0.9
8	Load Bus	0	0	1	0	0	0	345	1.1	0.9
9	Load Bus	125	50	1	0	0	0	345	1.1	0.9

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE: Case 9

หมายเลขบัส	กำลังการผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง(MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVA)	P _{max} (MW)	P _{min} (MW)	Q _{max} (MVA)	Q _{min} (MVA)	
1	0	0	250	10	300	-300	1
2	163	0	300	10	300	-300	1
3	85	0	270	10	300	-300	1

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 9

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ขีดเลขแดนซ์	การตั้งค่าแทน (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

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลราคาที่ใช้ในการดำเนินการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปแบบราคา	ราคาเริ่มต้นเครื่อง (ดอลลาร์/ชม)	ราคาปิดเครื่อง (ดอลลาร์/ชม)	ลำดับpolynomial	C_{n-1}	...	C_0
Polynomial	1500	0	3	0.11	5	150
Polynomial	2000	0	3	0.085	1.2	600
Polynomial	3000	0	3	0.1225	1	335

สมการ polynomial : $f(p) = c_n x^p + \dots + c_1 x + c_0$ โดยที่ p คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ n

2.ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 30: ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 30

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		ขนาด (p.u.)	แรงดันบัส		ขั้นซีลเซปแทนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)		ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	Slack Bus	0	0	1	0	0	0	135	1.05	0.95
2	Generator	21.7	12.7	1	0	0	0	135	1.1	0.95
3	Load Bus	2.4	1.2	1	0	0	0	135	1.05	0.95
4	Load Bus	7.6	1.6	1	0	0	0	135	1.05	0.95
5	Load Bus	0	0	1	0	0	0.19	135	1.05	0.95
6	Load Bus	0	0	1	0	0	0	135	1.05	0.95
7	Load Bus	22.8	10.9	1	0	0	0	135	1.05	0.95
8	Load Bus	30	30	1	0	0	0	135	1.05	0.95
9	Load Bus	0	0	1	0	0	0	135	1.05	0.95
10	Load Bus	5.8	2	1	0	0	0	135	1.05	0.95
11	Load Bus	5	0	1	0	0	0	135	1.05	0.95

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 30 (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	ชั้นดีเซลเซปแทนซ์ (Bs)	ค่าฐาน แรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)					V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
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
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

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 30 (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	ชั้นดีเซลเซปแทนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)						V_{max} (p.u.)	V_{min} (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

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE: Case 30

หมายเลขบัส	กำลังการผลิตไฟฟ้า			ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง			ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน			แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	กำลังการผลิตไฟฟ้า	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	กำลังการผลิตไฟฟ้าจริง	Q_{max} (MVAR)	Q_{min} (MVAR)		
1	23.54	0	0	80	0	0	150	-20	1	
2	60.97	0	0	80	0	0	60	-20	1	
22	21.59	0	0	50	0	0	62.5	-15	1	

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE: Case 30 (ต่อ)

หมายเลขบัส	กำลังการผลิตไฟฟ้า			ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	กำลังไฟฟ้ายกเว้น	P _{max} (MW)	P _{min} (MW)	Q _{max} (MVAR)	Q _{min} (MVAR)	
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

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 30

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		รีแอกแตนซ์	ขีดเซปแแตนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	อิมพีแดนซ์			
1	1	2	0.02	0.06	0.06	0.03	1
2	1	3	0.05	0.19	0.19	0.02	1
3	2	4	0.06	0.17	0.17	0.02	1
4	3	4	0.01	0.04	0.04	0	1
5	2	5	0.05	0.2	0.2	0.02	1
6	2	6	0.06	0.18	0.18	0.02	1
7	4	6	0.01	0.04	0.04	0	1
8	5	7	0.05	0.12	0.12	0.01	1

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 30 (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเซปแตนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 30 (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเชปแตนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 30 (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเซปแทนซ์	การตั้งค่าเทพ (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลราคาที่ใช้ในการดำเนินการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปแบบราคา	ราคาเริ่มต้นเครื่อง (ดอลลาร์/ชม)	ราคาปิดเครื่อง (ดอลลาร์/ชม)	ลำดับpolynomial	C_{n-1}	...	C_0
Polynomial	0	0	3	0.02	2	0
Polynomial	0	0	3	0.0175	1.75	0
Polynomial	0	0	3	0.0625	1	0
Polynomial	0	0	3	0.00834	3.25	0
Polynomial	0	0	3	0.025	3	0
Polynomial	0	0	3	0.025	3	0

สมการ polynomial : $f(p) = C_n x^p + \dots + C_1 x + C_0$ โดยที่ p คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกลดโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ n

3. ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 57: ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ = 100 MVA

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 57

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ระดับแรงดัน (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (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
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

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 57 (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส	ระดับชดเชยแปรผัน (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)				ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)
13	Load Bus	18	2.3	0.979	-9.79	0	1.06	0.94
14	Load Bus	10.5	5.3	0.97	-9.33	0	1.06	0.94
15	Load Bus	22	5	0.988	-7.18	0	1.06	0.94
16	Load Bus	43	3	1.013	-8.85	0	1.06	0.94
17	Load Bus	42	8	1.017	-5.39	0	1.06	0.94
18	Load Bus	27.2	9.8	1.001	-11.71	10	1.06	0.94
19	Load Bus	3.3	0.6	0.97	-13.2	0	1.06	0.94
20	Load Bus	2.3	1	0.964	-13.41	0	1.06	0.94
21	Load Bus	0	0	1.008	-12.89	0	1.06	0.94
22	Load Bus	0	0	1.01	-12.84	0	1.06	0.94
23	Load Bus	6.3	2.1	1.008	-12.91	0	1.06	0.94
24	Load Bus	0	0	0.999	-13.25	0	1.06	0.94
25	Load Bus	6.3	3.2	0.982	-18.13	5.9	1.06	0.94
26	Load Bus	0	0	0.959	-12.95	0	1.06	0.94

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 57 (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส	ระดับซีเอสไปแทนซี (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)				ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)
27	Load Bus	9.3	0.5	0.982	-11.48	0	1.06	0.94
28	Load Bus	4.6	2.3	0.997	-10.45	0	1.06	0.94
29	Load Bus	17	2.6	1.01	-9.75	0	1.06	0.94
30	Load Bus	3.6	1.8	0.962	-18.68	0	1.06	0.94
31	Load Bus	5.8	2.9	0.936	-19.34	0	1.06	0.94
32	Load Bus	1.6	0.8	0.949	-18.46	0	1.06	0.94
33	Load Bus	3.8	1.9	0.947	-18.5	0	1.06	0.94
34	Load Bus	0	0	0.959	-14.1	0	1.06	0.94
35	Load Bus	6	3	0.966	-13.86	0	1.06	0.94
36	Load Bus	0	0	0.976	-13.59	0	1.06	0.94
37	Load Bus	0	0	0.985	-13.41	0	1.06	0.94
38	Load Bus	14	7	1.013	-12.71	0	1.06	0.94
39	Load Bus	0	0	0.983	-13.46	0	1.06	0.94
40	Load Bus	0	0	0.973	-13.62	0	1.06	0.94

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 57 (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		จุดเริ่มต้นเซปแตรนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
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
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

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลแต่ละบัส IEEE: Case 57 (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชนิดขั้วสายเคเบิล	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
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

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE: Case 57

หมายเลขบัส	กำลังการผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	Q_{max} (MVAR)	Q_{min} (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

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 57

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีสเตมแบริช	การตั้งค่าเทป (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

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 57 (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเชปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE: Case 57 (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเซปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลราคาที่ใช้ในการดำเนินการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปแบบราคา	ราคาเริ่มต้นเครื่อง (ดอลลาร์/ชม)	ราคาปิดเครื่อง (ดอลลาร์/ชม)	ลำดับpolynomial	c_{n-1}	...	c_0
Polynomial	0	0	3	0.077579519	20	0
Polynomial	0	0	3	0.01	40	0
Polynomial	0	0	3	0.25	20	0
Polynomial	0	0	3	0.01	40	0
Polynomial	0	0	3	0.0222222222	20	0
Polynomial	0	0	3	0.01	40	0
Polynomial	0	0	3	0.0322580645	20	0

สมการ polynomial : $f(p) = c_n x^p + \dots + c_1 x p + c_0$ โดยที่ p คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกละเมิดโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ n

4. ระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus: ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรกฏ = 100 MVA

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส	ระดับขีดเซปเตนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)				ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)
1	Slack Bus	0	0	1.05	0	230	1.1	0.9
2	Load Bus	463.0199	115.754975	1	0	230	1.1	0.9
3	Load Bus	273.0054	68.25135	1	0	230	1.1	0.9
4	Generator	0	0	1.05	0	230	1.1	0.9
5	Generator	0	0	1.05	0	230	1.1	0.9
6	Load Bus	160.4396	40.1099	1	0	230	1.1	0.9
7	Generator	0	0	1.05	0	230	1.1	0.9
8	Generator	0	0	1.05	0	230	1.1	0.9
9	Load Bus	175.3359	43.833975	1	0	230	1.1	0.9
10	Load Bus	57.9239	14.480975	1	0	230	1.1	0.9
11	Generator	0	0	1.05	0	230	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVA _r)	แรงดันบัส		ชนิดข้อผิดพลาด	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVA _r)		ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V _{max} (p.u.)	V _{min} (p.u.)
12	Load Bus	0	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
13	Load Bus	50.8842	12.72105	12.72105	1	0	0	230	1.1	0.9
14	Load Bus	402.8865	100.721625	100.721625	1	0	0	230	1.1	0.9
15	Load Bus	151.8609	37.965225	37.965225	1	0	0	230	1.1	0.9
16	Load Bus	0	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
17	Generator	0	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
18	Load Bus	79.375	19.84375	19.84375	1	0	0	230	1.1	0.9
19	Load Bus	336.5881	84.147025	84.147025	1	0	0	230	1.1	0.9
20	Generator	0	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
21	Load Bus	277.6433	69.410825	69.410825	1	0	0	230	1.1	0.9
22	Load Bus	132.502	33.1255	33.1255	1	0	0	230	1.1	0.9
23	Load Bus	28.2707	7.067675	7.067675	1	0	0	230	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		ขนาด (p.u.)	แรงดันบัส		ระดับขีดเซตแอมป์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)		ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
24	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
25	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
26	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
27	Load Bus	244.3155	61.078875	1	0	0	0	230	1.1	0.9
28	Load Bus	81.814	20.4535	1	0	0	0	230	1.1	0.9
29	Load Bus	684.8569	171.214225	1	0	0	0	230	1.1	0.9
30	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
31	Load Bus	226.9727	56.743175	1	0	0	0	230	1.1	0.9
32	Load Bus	704.1322	176.03305	1	0	0	0	230	1.1	0.9
33	Load Bus	0	0	1	0	0	0	230	1.1	0.9
34	Load Bus	277.5364	69.3841	1	0	0	0	230	1.1	0.9
35	Load Bus	677.9643	169.491075	1	0	0	0	230	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)	แรงดันบัส		ชนิดบัสเซเปแทนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
36	Generator	0	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
37	Load Bus	0	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
38	Load Bus	629.8949	157.473725	0	1	0	0	230	1.1	0.9
39	Generator	0	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
40	Generator	0	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
41	Load Bus	0	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
42	Load Bus	0	0	0	1	0	0	230	1.1	0.9
43	Load Bus	399.2039	99.800975	0	1	0	0	230	1.1	0.9
44	Load Bus	399.2039	99.800975	0	1	0	0	230	1.1	0.9
45	Load Bus	980.0464	245.0116	0	1	0	0	230	1.1	0.9
46	Generator	0	0	0	1.05	0	0	230	1.1	0.9
47	Load Bus	492.644	123.161	0	1	0	0	230	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		แรงดันบัส		ชนิดชิลเซปแทนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVA _r)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V _{max} (p.u.)	V _{min} (p.u.)
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
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

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVA _r)	แรงดันบัส		ชนิดขั้วสลับแดนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kv)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVA _r)		ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V _{max} (p.u.)	V _{min} (p.u.)
60	Load Bus	306.6467	76.661675	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9
61	Load Bus	401.3789	100.344725	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9
62	Load Bus	747.6959	186.923975	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9
63	Load Bus	523.1057	130.776425	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9
64	Load Bus	346.317	86.57925	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9
65	Generator	0	0	1.05	0	1.1	0	230	1.1	0.9
66	Load Bus	181.7818	45.44545	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9
67	Load Bus	291.0315	72.757875	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9
68	Generator	0	0	1.05	0	1.1	0	230	1.1	0.9
69	Generator	0	0	1.05	0	1.1	0	230	1.1	0.9
70	Generator	0	0	1.05	0	1.1	0	230	1.1	0.9
71	Load Bus	84.1401	21.035025	1	0	1.1	0	230	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVA _r)	แรงดันบัส		ชนิดขั้วสลับแดนซ์ (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าที่ต่อที่บัส (MVA _r)		ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V _{max} (p.u.)	V _{min} (p.u.)
72	Load Bus	84.1401	21.035025	1	0	230	0	230	1.1	0.9
73	Generator	0	0	1.05	0	230	0	230	1.1	0.9
74	Generator	0	0	1.05	0	230	0	230	1.1	0.9
75	Generator	0	0	1.05	0	230	0	230	1.1	0.9
76	Load Bus	292.6917	73.172925	1	0	230	0	230	1.1	0.9
77	Load Bus	172.671	43.16775	1	0	230	0	230	1.1	0.9
78	Load Bus	492.4553	123.113825	1	0	230	0	230	1.1	0.9
79	Generator	0	0	1.05	0	230	0	230	1.1	0.9
80	Load Bus	463.4348	115.8587	1	0	230	0	230	1.1	0.9
81	Generator	0	0	1.05	0	230	0	230	1.1	0.9
82	Load Bus	122.0126	30.50315	1	0	230	0	230	1.1	0.9
83	Generator	0	0	1.05	0	230	0	230	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		ขนาด (p.u.)	แรงดันบัส		ชนิดข้อผิดพลาด	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)		ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
84	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
85	Load Bus	0	0	1	0	0	0	230	1.1	0.9
86	Load Bus	85.117	21.27925	1	0	0	0	230	1.1	0.9
87	Load Bus	40.383	10.09575	1	0	0	0	230	1.1	0.9
88	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
89	Load Bus	0	0	1	0	0	0	230	1.1	0.9
90	Load Bus	0	0	1	0	0	0	230	1.1	0.9
91	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
92	Generator	0	0	1.05	0	0	0	230	1.1	0.9
93	Load Bus	0	0	1	0	0	0	230	1.1	0.9
94	Load Bus	0	0	1	0	0	0	230	1.1	0.9
95	Load Bus	0	0	1	0	0	0	115	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส	ชนิดขั้วเสียบเตา (Bs)	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kv)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)				ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)
96	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
97	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
98	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
99	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
100	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
101	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
102	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
103	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
104	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
105	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9
106	Load Bus	0	0	1	0	230	1.1	0.9
107	Load Bus	0	0	1	0	115	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อที่บัส		แรงดันบัส		ชนิดข้อต่อ	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kV)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVar)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (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
119	Load Bus	0	0	1	0	0	115	1.1	0.9

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลแต่ละบัส Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	ชนิดบัส	ภาระไฟฟ้าที่ต่อบัส		แรงดันบัส		ระดับแรงดัน	ค่าฐานแรงดันไฟฟ้า (Base kv)	ขีดจำกัดแรงดันบัส	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	ขนาด (p.u.)	มุมเฟส (องศา)			V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
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

ตารางที่ ข.14 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 Bus

หมายเลขบัส	กำลังการผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	Q_{max} (MVAR)	Q_{min} (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

ตารางที่ ข.14 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	กำลังการผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	P _{max} (MW)	P _{min} (MW)	Q _{max} (MVAR)	Q _{min} (MVAR)	
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
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

ตารางที่ ข.14 ข้อมูลแต่ละบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Thailand 124 Bus (ต่อ)

หมายเลขบัส	กำลังการผลิตไฟฟ้า		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง		ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน		แรงดันติดตั้ง (p.u.)
	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAR)	P _{max} (MW)	P _{min} (MW)	Q _{max} (MVAR)	Q _{min} (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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชเลขบแทนซ์	การตั้งค่าเทป (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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชิวเลขไปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชั้เลขบัสแดนซ์	การตั้งค่าแพบ (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชดเชยแคปซิท	การตั้งค่าแคป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชดเชยไปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชัสเซปแทนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเอชแดนซ์	การตั้งค่าแอมป์ (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชดเชยไปแทนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
108	34	42	0.00331	0.02542	0	1
109	35	36	0.01252	0.09625	0.00222	1
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเซปแทนซ์	การตั้งค่าแอมป์ (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชดเชยไปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
154	47	55	0.00018	0.0014	0	1
155	48	55	0.00036	0.00276	0	1

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีรีส์เบสแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเซปแตนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชดเชยไปเตนซ์	การตั้งค่าแทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชื่อสายส่ง	การตั้งค่าเทพ (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ชั้เลขแดนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
219	72	73	0.02505	0.19249	0.00222	1
220	72	73	0.02505	0.19249	0.00222	1
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเซปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีรีส์เบสแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีเอสเอชแดนซ์	การตั้งค่าแทน (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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเซปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
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

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเชปแดนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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
313	118	124	0.07425	0.34595	0.00056	1
314	118	124	0.07425	0.34595	0.00056	1

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง Thailand 124 Bus (ต่อ)

ลำดับสายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	อิมพีแดนซ์		ซีลเซปแทนซ์	การตั้งค่าเทป (p.u.)
			ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์		
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

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ นายเทียนชัย พาเทศ รหัสนักศึกษา 56010491

ที่อยู่ 789 ม.10 ต.หนองกี่ อ.กบินทร์บุรี จ.ปราจีนบุรี 25110

E-mail phenomenon_topz@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เขื่อนศรีนครินทร์ ต.ท่ากระดาน อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี 71250



ชื่อ นางสาวพิชชารีย์ อภินันท์ธนากร รหัสนักศึกษา 56010849

ที่อยู่ 1309 ม.6 ต.อู่ทอง อ.อู่ทอง จ.สุพรรณบุรี 72160

E-mail pitcharee.a@gmail.com

สถานที่ฝึกงาน โรงไฟฟ้า อู่ทองไปโอพาวเวอร์ ต.พลับพลาไชย อ.อู่ทอง จ.สุพรรณบุรี 72160



ชื่อ นายวิศวะ ตะพานวงศ์ รหัสนักศึกษา 56011151

ที่อยู่ 32/219 ม.1 ต.คลองสี่ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

E-mail god_blade@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน บริษัท การบินไทย จำกัด ต.หนองปรือ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540