

เทคนิคการถ่ายโอนโหนดทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

นายอุดมศักดิ์ ทองกระจาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

**GENERALIZED LOAD TRANSFER TECHNIQUE FOR
POWER FLOW ANALYSIS**

Udomsak Thongkrajay

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2007

เทคนิคการถ่ายโอนโพลิตัวไปสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธนาชัย กุลวรรณพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อุดมศักดิ์ ทองกระจาย : เทคนิคการถ่ายโอนโหลดทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์การไหลของ
กำลังไฟฟ้า (GENERALIZED LOAD TRANSFER TECHNIQUE FOR POWER FLOW
ANALYSIS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ชนัดชัย กุลวรรณพงษ์, 185 หน้า

ปัจจุบันนี้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนสูง การต่อเชื่อมโหลดและการติดตั้งอุปกรณ์
ชดเชยกำลังไฟฟ้าในบางกรณีเป็นการเพิ่มบัสใหม่ให้ระบบ ส่งผลให้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า
และตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้ง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการ
พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อถ่ายโอนโหลดในรูป กระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ กำลังไฟฟ้า
และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า ที่ติดตั้งอยู่ที่โนดเสริมให้ไปอยู่ที่โนดข้างเคียง ด้วยหลักการนี้ไม่ว่า
จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยจำนวนมากเพียงใดก็ตาม จำนวนโนดที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีค่าเท่า
เดิมเสมอ วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ การคำนวณ
การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล และนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด
เขียนโปรแกรมโดยใช้ MATLAB ระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส และ 85 บัส ถูกนำมาใช้
เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ จากการดำเนินงานวิจัยพบว่า เวลาที่ใช้ประมวลผล
ลดลง การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด
ช่วยแก้ปัญหาสถานะเลว (ill-condition) ได้เป็นอย่างดี การหาดำเนินการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ
จ่ายกำลังไฟฟ้า อาจพิจารณาจากดัชนี *LSF* (Loss Sensitivity Factors) หรือ ดัชนี *PLI* (Power Loss
Index) ส่วนขนาดของตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด วิทยานิพนธ์นี้
นำเสนอการหาดำเนินการติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM โดยใช้เทคนิค
การถ่ายโอนโหลดร่วมกับจินเนติกอัลกอริทึม และนำระบบทดสอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นครราชสีมา 2 (วงจร 10) มาเป็นกรณีศึกษา การหาดำเนินการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่าย
กำลังไฟฟ้า 22 kV ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบน้อยที่สุด จากการดำเนินงานวิจัยพบว่า
ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ทำการค้นหาโดยใช้จินเนติก
อัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียของ
ระบบมีค่าลดลง

UDOMSAK THONGKRAJAY : GENERALIZED LOAD TRANSFER

TECHNIQUE FOR POWER FLOW ANALYSIS. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D. 185 PP.

LOAD TRANSFER/ILL-CONDITION/POWER FLOW

At present, electric power systems have become more complex. Installation of load and compensation equipment in some cases places an additional bus into the system. Therefore, a total number of power flow equations and voltage unknowns is increased due to additional location of the installed device. It may result in a computational convergence problem. This thesis presents a mathematical model for transferring load in various forms (eg. current, impedance, power, compensator, etc) at additional buses to their two adjacent buses. Thus, the total number of power flow equations is not changed. 15 bus, 34 bus, 69 bus and 85 bus systems are used for evaluation. The tests were conducted by using programming codes for the MATLAB environment developed by the author of this thesis. In power flow calculation by using Gauss-Seidel and Newton-Raphson iterative method together with the proposed load transfer technique, the overall execution time is significantly reduced. Furthermore, the power flow calculation is solvable due to some serious ill-conditions. In practice, the load transfer technique can be applicable to several applications. Location and sizing problems of distribution capacitors is selected to evaluate the use of the load transfer technique. In comparison, capacitor installation problems based on *LSF* (Loss Sensitivity Factors) and *PLI* (Power loss Index) indices are employed. Feeder 10 of PEA (Provincial Electricity Author) 22 kV power distribution systems in Nakhon Ratchasima is used as a test system. As a result, the proposed load transfer technique

can improve voltage profile and power loss reduction significantly when compared to the results obtained by using other conventional methods.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

คุณอัญชลี รักด่านกลาง คุณภัทรวรรณ เคนพะนาน และคุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ ที่ได้ช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์และช่วยติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอบคุณ นางสาวสุพัตรา ทองมา ที่ได้ช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยในยามท้อและทุกข์ใจเรื่อยมา

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

อุดมศักดิ์ ทองกระจ่าย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ค

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงาน	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ทัศนวิสัยธรรมชาติและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ทัศนวิสัยธรรมชาติ	5
2.3 แบบจำลองการกำจัดไนโตรเจน	6
2.4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า	7
2.4.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	8
2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	13
2.5 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า	23
2.6 การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 สรุป	26
3 เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า	27
3.1 บทนำ.....	27
3.2 เทคนิคการถ่ายโอนโหลด.....	27
3.2.1 แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า	27
3.2.2 แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์	31
3.2.3 แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า.....	33
3.3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	35
3.4 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	39
3.5 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	49
3.6 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	52
3.7 เทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชย	61
3.7.1 อุปกรณ์ชดเชยตัวเก็บประจุ	61
3.7.2 อุปกรณ์ชดเชย SVC	64
3.7.3 อุปกรณ์ชดเชย D-STATCOM.....	66
3.8 สรุป	68
4 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	69
4.1 บทนำ.....	69
4.2 แบบจำลองตัวเก็บประจุ.....	69
4.2.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	70
4.2.2 แบบจำลองชดเชยปฏิกิริยา	70
4.3 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีความไวต่อกำลังงานสูญเสีย.....	71
4.3.1 ตัวประกอบความไวการสูญเสีย LSF.....	71
4.3.2 ดัชนีกำลังงานสูญเสีย PLI	73
4.4 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า	75
4.4.1 การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	75

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 การหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ.....	75
4.4.3 จินเนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น.....	76
4.4.4 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด.....	78
4.5 ผลการทดสอบ.....	79
4.6 สรุป.....	107
5 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM ที่เหมาะสม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	108
5.1 บทนำ.....	108
5.2 แบบจำลอง SVC.....	108
5.3 แบบจำลอง D-STATCOM.....	109
5.4 ผลการทดสอบ.....	110
5.5 สรุป.....	130
6 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV	131
6.1 บทนำ.....	131
6.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV นครราชสีมา 2 (วงจร 10).....	131
6.3 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV	132
6.3.1 การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	133
6.3.2 การหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ.....	133
6.4 ผลการทดสอบ.....	135
6.5 สรุป.....	144
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	145
7.1 สรุป.....	145
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	147
รายการอ้างอิง.....	149

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ระบบทดสอบ	152
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	183
ประวัติผู้เขียน	185

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทของโหลดทดสอบ 40
3.2	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า 41
3.3	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ 42
3.4	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า 42
3.5	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า 44
3.6	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ 44
3.7	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า 45
3.8	ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 15 บัส 45
3.9	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า 46
3.10	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ 47
3.11	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า 47
3.12	ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 34 บัส 47
3.13	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า 48
3.14	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ 49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.15 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า	49
3.16 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทของโหลดทดสอบ	52
3.17 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า	53
3.18 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์	54
3.19 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า	54
3.20 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า	55
3.21 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์	56
3.22 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า	56
3.23 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 69 บัส	57
3.24 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า	58
3.25 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์	58
3.26 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า	59
3.27 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 85 บัส	59
3.28 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า	60

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.29 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์	61
3.30 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า	61
4.1 ลักษณะสมบัติของวิธีการค้นหาคำตอบ	77
4.2 ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 15 บัส	80
4.3 ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 34 บัส	82
4.4 ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 69 บัส	85
4.5 ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 85 บัส	87
4.6 ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 15 บัส	89
4.7 ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 34 บัส	90
4.8 ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 69 บัส	92
4.9 ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 85 บัส	93
4.10 ค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB	94
4.11 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 15 บัส	96
4.12 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 15 บัส	96
4.13 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส	96
4.14 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 34 บัส	99
4.15 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 34 บัส	99
4.16 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส	99
4.17 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 69 บัส	102
4.18 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 69 บัส	102
4.19 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส	102
4.20 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 85 บัส	105
4.21 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 85 บัส	105
4.22 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัส	105

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.1	ค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB 112
5.2	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลดปกติ 112
5.3	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM..... 113
5.4	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ 115
5.5	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่า ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM..... 116
5.6	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ 118
5.7	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 2 เท่า ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM..... 119
5.8	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ 121
5.9	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM..... 122
5.10	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ 124
5.11	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่า ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM..... 125
5.12	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ 127
5.13	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่า ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM..... 128
6.1	ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 131 บัส 136

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.2	ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 131 บัส 138
6.3	ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 131 บัส สถานะโหลดปกติ 140
6.4	แรงดันบัสด้านก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 131 บัส สถานะโหลดปกติ 141
6.5	กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 131 บัส สถานะโหลดปกติ 141
6.6	ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 131 บัส สถานะโหลด 2 เท่าของโหลดในสถานะปกติ..... 142
6.7	แรงดันบัสด้านก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 131 บัส สถานะโหลด 2 เท่าของโหลดในสถานะปกติ..... 143
6.8	กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 131 บัส สถานะโหลด 2 เท่าของโหลดในสถานะปกติ..... 143
ก.1	ข้อมูลบัสด้านของระบบทดสอบ 15 บัส 153
ก.2	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 15 บัส 154
ก.3	ข้อมูลบัสด้านของระบบทดสอบ 34 บัส 155
ก.4	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 34 บัส 157
ก.5	ข้อมูลบัสด้านของระบบทดสอบ 69 บัส 159
ก.6	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส 161
ก.7	ข้อมูลบัสด้านของระบบทดสอบ 85 บัส 165
ก.8	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส 168
ก.9	ข้อมูลบัสด้านของระบบทดสอบ 131 บัส 173
ก.10	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส 178

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังก่อนการชดเชย	2
1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังหลังการเพิ่มโหลดและติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย.....	2
2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น.....	8
2.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล.....	13
2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	22
2.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 บัส	23
2.5 แบบแผนพื้นฐานไทรสเตอร์ของตัวควบคุม FACTS.....	25
3.1 บัส i ที่มีโหลดกระแสไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่.....	28
3.2 แบบจำลองการย้ายโหลดกระแสไฟฟ้าจากบัส i มายังบัสข้างเคียง k และ m	29
3.3 บัส i ที่มีโหลดอิมพีแดนซ์ต่อเชื่อมอยู่.....	31
3.4 แบบจำลองการย้ายโหลดอิมพีแดนซ์จากบัส i มายังบัสข้างเคียง k และ m	31
3.5 บัส i ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่.....	33
3.6 แบบจำลองการย้ายโหลดกำลังไฟฟ้าจากบัส i มายังบัสข้างเคียง k และ m	33
3.7 บัส k และบัส m เมื่อมีการถ่ายโอนโหลดในระบบไฟฟ้า.....	35
3.8 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด	39
3.9 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด	51
3.10 บัส i ที่มีตัวเก็บประจุต่อเชื่อมอยู่.....	62
3.11 แบบจำลองการย้ายตัวเก็บประจุจากบัส i มายังบัสข้างเคียง k และ m	63
3.12 บัส i ที่มี SVC ต่อเชื่อมอยู่.....	65
3.13 ตัวชดเชยค่าซัสเซปแดนซ์ของ SVC ที่บัส i ใด ๆ	65
3.14 แบบจำลองการย้าย SVC จากบัส i มายังบัสข้างเคียง k และ m	65
3.15 บัส i ที่มี D-STATCOM ต่อเชื่อมอยู่.....	66
3.16 วงจรสมมูลนอร์ตันของ D-STATCOM.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17	แบบจำลองการย้าย D-STATCOM จากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m 67
4.1	ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส k ใด ๆ 70
4.2	ตัวชดเชยชดเชยแรงดันของตัวเก็บประจุที่บัส k ใด ๆ..... 71
4.3	แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส..... 71
4.4	แผนภาพระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเส้นเดียว..... 74
4.5	วัฏจักรของเงินเนติกอัลกอริทึม 77
4.6	บัสเสริม l ที่มีตัวเก็บประจุต่อเชื่อมอยู่..... 78
4.7	แบบจำลองการถ่ายโอนตัวเก็บประจุ..... 79
4.8	ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 15 บัส..... 81
4.9	นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 15 บัส..... 81
4.10	ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 34 บัส..... 83
4.11	นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 34 บัส..... 84
4.12	ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 69 บัส..... 85
4.13	นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 69 บัส..... 86
4.14	ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 85 บัส..... 87
4.15	นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 85 บัส..... 88
4.16	ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 15 บัส..... 89
4.17	ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 34 บัส..... 91
4.18	ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 69 บัส..... 92
4.19	ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 85 บัส..... 94
4.20	ดัชนี LSF หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส..... 97
4.21	ดัชนี PLI หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส..... 97
4.22	ดัชนี LSF หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส..... 100
4.23	ดัชนี PLI หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส..... 100
4.24	ดัชนี LSF หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส..... 103
4.25	ดัชนี PLI หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส..... 103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26	ดัชนี <i>LSF</i> หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัส 106
4.27	ดัชนี <i>PLI</i> หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัส 106
5.1	ตัวชดเชยค่าชดเชยแบบแปรปรวนปรับค่าได้ของ SVC ที่บัส k ใด ๆ 109
5.2	แบบจำลอง D-STATCOM ในสถานะคงตัวที่บัส k ใด ๆ 110
5.3	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง SVC 114
5.4	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM 114
5.5	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติและติดตั้ง SVC 117
5.6	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM 117
5.7	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติและติดตั้ง SVC 120
5.8	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM 120
5.9	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง SVC 123
5.10	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM 123
5.11	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติและติดตั้ง SVC 126
5.12	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM 126
5.13	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติและติดตั้ง SVC 129
5.14	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM 129
6.1	ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 132
6.2	แผนภาพการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด 134
6.3	ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 131 บัส 137
6.4	ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 131 บัส 139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 ระบบทดสอบ 15 บั๊ต	153
ก.2 ระบบทดสอบ 34 บั๊ต	155
ก.3 ระบบทดสอบ 69 บั๊ต	158
ก.4 ระบบทดสอบ 85 บั๊ต	164
ก.5 ระบบทดสอบ 131 บั๊ต	172

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	หน่วยของกระแสไฟฟ้า
B_{cap}	ค่าชัศเชิงประจักษ์ของตัวเก็บประจุ
Capacitor[n]	ขนาดตัวเก็บประจุที่ n
I_{12}	กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ k
$I_a[k]$	ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจริงในสายส่งเส้นที่ k
$I_{D,k}$	โหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k
$I_l^{(k)}$	กระแสไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนจากบัส l ไปยังบัส k
$I_l^{(m)}$	กระแสไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนจากบัส l ไปยังบัส m
Index[n]	ดัชนีของบัสที่ n
$I_r[k]$	ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจินตภาพในสายส่งเส้นที่ k
kV	หน่วยกิโลของแรงดันไฟฟ้า
kVar	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
kVA	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน
kW	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
l	บัสเสริม l
P	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
$P_{cal,k}$	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
$P_{eff}[m]$	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส m
P_{loss}	กำลังงานสูญเสียแอกทีฟ
$P_{line loss}$	กำลังงานสูญเสียแอกทีฟในสายส่ง
$P_{mis,max}$	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
Q	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
$Q_{cal,k}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
$Q_{c,i}$	ขนาดตัวเก็บประจุที่บัส i
$Q_{c,i}^{min}$	ขนาดน้อยที่สุดของตัวเก็บประจุที่บัส i
$Q_{c,i}^{max}$	ขนาดมากที่สุดของตัวเก็บประจุที่บัส i

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$Q_{eff}[m]$	กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส m
Q_{loss}	กำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ
$Q_{lineloss}$	กำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟในสายส่ง
$Q_{load}[n]$	โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดที่บัส n
$Q_{mis,max}$	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
$S_{cap,k}$	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุที่บัส k
$S_{D,k}$	กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k
$S_{gen,k}$	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัส k
$S_{G,k}$	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k
$S_{lineloss}$	กำลังงานสูญเสียในสายส่ง
$S_{load,k}$	กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k
S_{loss}	กำลังงานสูญเสีย
$S_{sch,k}$	กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส k
Total Q	โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดในระบบไฟฟ้า
$T_{Qload}[n]$	โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส n
V_k	แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
$V_k^{(h)}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัส k รอบการคำนวณที่ h ใด ๆ
$V[n]$	แรงดันไฟฟ้าที่บัส n
$y_{k,i}$	แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i
$Y_{k,i}$	สมาชิกแถวที่ k หลักที่ i ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
Y_{bus}	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
Z	ความต้านทานเชิงซ้อนของสายส่ง
$Z_{D,k}$	โหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส k
α	ดัชนีระบุตำแหน่งบัสเสริมในสายส่งมีค่าในช่วง $0 - 1.0$
$\beta_{D,k}$	มุมของของโหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส k
δ_k	มุมของแรงดันที่บัส k
ε_{tol}	ความคลาดเคลื่อนในการหยุด
$\phi_{D,k}$	มุมของโหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

γ	ตัวประกอบเร่งการลู่เข้า
Ω	หน่วยของความต้านทาน
$ I_{D,k} $	ขนาดของโหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k
$ V_k $	ขนาดแรงดันที่บัส k
$ Z_{D,k} $	ขนาดของโหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส k
ΔP_k	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส k
ΔQ_k	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส k
$\Delta \delta$	ผลต่างของมุมแรงดันที่บัส
$\Delta V $	ผลต่างของขนาดแรงดันที่บัส
*	ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน
ANN	Artificial Neural Network
DVR	Dynamic Voltage Restorer
D-STATCOM	Distribution Static Synchronous Compensator
DWDM	Dantzig-Wolfe Decomposition Method
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
GA	Genetic Algorithm
GBD	Generalized Benders Decomposition
GRG	Generalized Reduced Gradient
HM	Heuristic Method
KCL	Kirchhoff's Current Law
KVL	Kirchhoff's Voltage Law
LP	Linear Programming
LRDM	Lagrange Relaxation Decomposition Method
LSF	Loss Sensitivity Factors
LTT	Load Transfer Technique
MIP	Mixed Integer Programming
p.u.	per unit system
PLI	Power loss Index

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SA	Simulated Annealing
SGSPF	Standard Gauss-Seidel Power Flow
SNRPF	Standard Newton-Raphson Power Flow
SQP	Successive Quadratic Programming
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
TCSC	Thyristor-Controlled Series Capacitor
TGSPF	Transfer Gauss-Seidel Power Flow
TNRPF	Transfer Newton-Raphson Power Flow

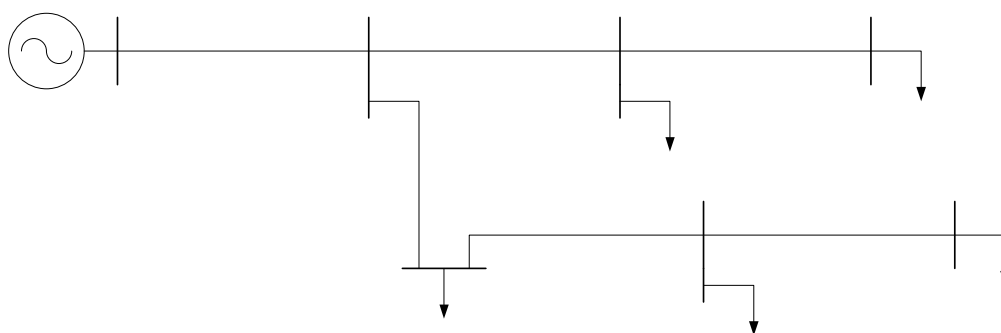
บทที่ 1

บทนำ

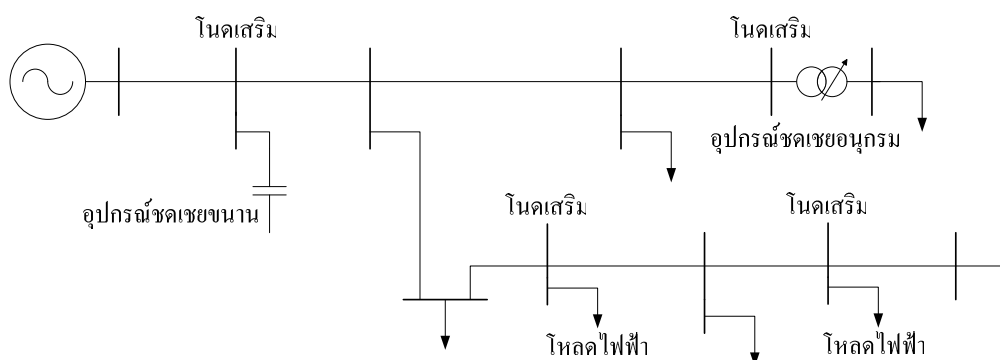
1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมมีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้นตามลำดับแต่การสร้างสถานีไฟฟ้าและการส่งจ่ายทำได้อย่างจำกัด ซึ่งเกิดจากเหตุผลหลายประการ เช่น งบประมาณ และพื้นที่ในการสร้างสายส่งไฟฟ้าเพื่อส่งไปยังผู้ใช้ไฟ ผลที่เกิดตามมาคือ สายส่งไฟฟ้ามีจำกัดแต่ปริมาณผู้ใช้ไฟฟ้ามีจำนวนมากขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันตกในสายส่งมากขึ้น เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ามากขึ้นเนื่องจากปริมาณโหลดที่มากเกินไปซึ่งปัญหาเหล่านี้มักเกิดกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV และ 24 kV ทำให้การไฟฟ้าต้องหาวิธีในการแก้ปัญหาในเรื่องนี้ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาที่ง่ายและสะดวกกว่าการสร้างเส้นทางสายส่งเพิ่มนั่นก็คือ การนำเอาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกหรืออุปกรณ์ในการตรวจสอบความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังมาติดตั้งระหว่างสายส่งเพื่อเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ผลจากการนำอุปกรณ์ชดเชยเหล่านี้มาติดตั้งระหว่างสายส่งนี้ทำให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการติดตั้งตัวชดเชยในตำแหน่งดังกล่าวส่งผลให้จำนวนโหนดในระบบไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ชดเชยที่ติดตั้ง การวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เช่น การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า การคำนวณความผิดปกติ ตลอดจนการวางแผนการจ่ายโหลดจะทำให้ยากขึ้นและใช้เวลาคำนวณที่ยาวนาน

จากปัญหาที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ทำให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังทำได้ยากยิ่งขึ้นทำให้เกิดคำถามตามมาว่า สามารถทำให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยต่าง ๆ ได้อย่างไร โดยที่ผลที่ได้ยังคงเหมือนเดิมทุกประการแต่สามารถลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาอัลกอริทึมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนดังกล่าวนี้แทนการวิเคราะห์แบบเดิม พิจารณาได้จากรูปต่อไปนี้



รูปที่ 1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังก่อนการชดเชย



รูปที่ 1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังหลังการเพิ่มโหลดและติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย

เทคนิคนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อถ่ายโอนโหนดในรูปแบบต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่ที่โนดเสริมดังในรูปที่ 1.2 ให้ไปอยู่ที่โนดข้างเคียง ด้วยหลักการนี้ ไม่ว่าจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยหรือเพิ่มโหนดจำนวนมากเพียงใดก็ตาม จำนวนโนดที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีค่าเท่าเดิมเสมอ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งถือว่าเป็นเครื่องมือพื้นฐานจะทำได้อย่างรวดเร็ว สามารถนำมาใช้เพื่อประกอบการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ไม่ว่าจะเป็นปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเหมาะสมที่สุด (optimal reactive power flow problems) การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง และอื่น ๆ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อพัฒนาเทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าให้ง่ายและรวดเร็วขึ้นในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้ากำลัง
- นำอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้วิเคราะห์ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา และระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะคงตัว
- พิจารณาระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการชดเชยโดยเน้นไปที่การชดเชยแบบขนานเป็นหลัก
- ทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสายป้อนสมดุลในสถานะการจ่ายโหลดสมดุล
- ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ไม่พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- พัฒนาเทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้แบบจำลองโหลดในรูปแบบกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และอุปกรณ์ FACTS
- พัฒนาเทคนิคการถ่ายโอนโหลดเพื่อคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าให้มีอัตราการลู่เข้าและใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็ว
- นำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา และระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE
- แก้ปัญหาคำหนดที่ตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนโหลดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้แบบจำลองโหลดในรูปแบบ กระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ กำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า
- ได้อัลกอริทึมใหม่ที่ทำให้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ามีความสะดวกมากยิ่งขึ้น
- ได้แนวทางใหม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่ง่ายยิ่งขึ้น
- ได้โปรแกรมจำลองผลโดยใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นใหม่และมีคุณภาพยิ่งขึ้น
- ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 2 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยรวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แบบจำลองการกำจัดโนด การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและกำลังงานสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

บทที่ 3 กล่าวถึงเทคนิคการถ่ายโอนโหลดกระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และกำลังไฟฟ้า การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด รวมทั้งผลทดสอบการไหลกำลังไฟฟ้า และกล่าวถึงเทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชย 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM

บทที่ 4 กล่าวถึงการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้ตัวประกอบความไวการสูญเสีย คำนวณกำลังงานสูญเสีย และเทคนิคการถ่ายโอนโหลดร่วมกับการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม รวมทั้งผลทดสอบการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ

บทที่ 5 กล่าวถึงการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของ SVC และ D-STATCOM ที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดเพื่อหาค่าเหมาะที่สุด รวมทั้งผลทดสอบการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

บทที่ 6 กรณีศึกษาการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ในสภาวะการจ่ายโหลดปกติและสภาวะจ่ายโหลด 2 เท่าของสภาวะปกติ รวมทั้งผลทดสอบการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุสำหรับวงจร 10

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของระบบทดสอบ ซึ่งเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ประกอบด้วย ระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 85 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV ระบบทดสอบ 69 บัส เป็นระบบทดสอบ 12.66 kV และระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส เป็นระบบทดสอบ 22 kV ระบบทดสอบทั้งหมดมีกำลังงานกำลังไฟฟ้า 100 kVA

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุดสิ่งหนึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นและเป็นเครื่องมือพื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเรื่องอื่น ๆ เช่น การคำนวณความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง การพิจารณาแรงดันตก การพิจารณาเรื่องฮาร์มอนิก รวมถึงการวางแผนการจ่ายโหลดไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าตามสถานที่ต่าง ๆ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามีจุดมุ่งหมายเพื่อหาคุณลักษณะการทำงานในสภาวะคงตัวของระบบกำลังไฟฟ้า ผลที่ได้ประกอบด้วยขนาดแรงดันและมุมเฟสที่บัสต่าง ๆ รวมไปถึงกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แบบจำลองการกำจัดโนด การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล และนิวตัน-ราฟสัน ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง และการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเบื้องต้นเกี่ยวกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น การหาผลเฉลยซึ่งประกอบด้วยขนาดของแรงดันและมุมเฟสที่บัสต้องอาศัยกระบวนการวนรอบเข้ามาช่วยเพื่อหาผลเฉลย วิธีการหาผลเฉลยดังกล่าวได้ถูกนำเสนออย่างต่อเนื่อง ดังปรากฏใน Das, Nagi, and Kothari (1994), Das, Kothari, and Kalam (1995), and Haque (2000) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ได้มีการนำเอาการคำนวณแบบขนานเข้ามาช่วย เพื่อให้การคำนวณใช้เวลาลดลง ดังปรากฏใน Koester, Ranka, and Fox (1994) การปรับปรุงอัตราการเข้าสู่ของวิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อแก้ปัญหาสถานะเลว (ill-condition) โดยการรวมพจน์อันดับสองเข้าในสมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ดังปรากฏใน Keyhani, Abur, and Hao (1989) นอกจากนี้มีผู้วิจัยบางกลุ่มได้นำเทคนิคการกำจัดโนดในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อลดขนาดของระบบไฟฟ้ากำลังให้เล็กลง จากนั้นจึงคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ดังเช่น Jawad Talaq (1995) ได้นำเสนอสมการแบบจำลองโหลด เพื่อใช้ในการกำจัดบัสในระบบ

ไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้ระบบไฟฟ้าถูกลดรูปและแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะถูกลดขนาดให้เหลือเท่ากับจำนวนของบัสควบคุมแรงดันและตัวแปรของแบบจำลองการลดรูปคือบัสที่ถูกควบคุมแรงดัน ทำให้ตัวแปรที่ต้องคำนวณหาเหลือเพียงมุมของแรงดันบัสเท่านั้น จากนั้นจึงใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันคำนวณหาแรงดันบัสที่ถูกลดรูป เทคนิคดังกล่าวทำให้จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง งานวิจัยของ Chung, Tse, and David (1997) ได้เสนอแนวทางการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแนวทางใหม่โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนดและการกำจัดบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง วิธีการนี้คล้ายกับวิธีของ Jawad Talaq ที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคนี้พบว่าค่าอัตราส่วน R/X ของระบบไฟฟ้าไม่มีผลต่อการลู่เข้าของคำตอบ จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองโหนดที่ใช้ด้วย โดยทุกเทคนิคที่พัฒนาขึ้นล้วนแต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือ ลดระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ปรับปรุงอัตราการลู่เข้ารวมไปถึงการประหยัดหน่วยความจำของอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาด้านมุ่งไปที่หลักการพื้นฐานของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

2.3 แบบจำลองการกำจัดโหนด (node elimination model)

เทคนิคการกำจัดโหนดเป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณและหน่วยความจำที่คอมพิวเตอร์ต้องใช้ประมวลผลในการแก้ปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ เทคนิคการกำจัดโหนดที่ไม่มีโหนดต่ออยู่ โดยใช้การลดรูปเมตริกซ์โครงข่าย เช่น เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ โดยการจัดรูปสมการเมตริกซ์และแทนค่าตัวแปรให้เหมาะสมเพื่อกำจัดตัวแปรประจำโหนดที่ไม่มีโหนดออกไป พิจารณาได้ดังนี้

ถ้ากำหนดให้โครงข่ายทางไฟฟ้ากำลังเขียนแทนได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$[Y_{node}][V_{node}] = [I_{node}] \quad (2-1)$$

ดำเนินการจัดเรียงโหนดของสมการเมตริกซ์ดังกล่าวใหม่ โดยนำโหนดที่มีกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดเข้าระบบหรือกระแสจากโหนดดึงออกจากโหนดมาเรียงซ้อนกัน เรียกว่า เมตริกซ์ย่อย $[I_G]$ และ โหนดที่ไม่มีกระแสติดเข้าหรือดึงออกไป เรียกว่า เมตริกซ์ย่อย $[I_L] = 0$ จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} Y_{L,L} & Y_{L,G} \\ Y_{G,L} & Y_{G,G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} Y_{L,L} & Y_{L,G} \\ Y_{G,L} & Y_{G,G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_G \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

เขียนสรุปสมการได้ดังนี้

$$Y_{L,L}V_L + Y_{L,G}V_G = 0 \quad (2-4)$$

$$Y_{G,L}V_L + Y_{G,G}V_G = I_G \quad (2-5)$$

จะได้ว่า

$$V_L = -Y_{L,L}^{-1}Y_{L,G}V_G \quad (2-6)$$

แทนค่าสมการที่ (2-6) ลงในสมการที่ (2-5) และจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$\{Y_{G,G} - Y_{G,L}Y_{L,L}^{-1}Y_{L,G}\}V_G = I_G \quad (2-7)$$

นั่นคือ

$$[Y_G][V_G] = [I_G] \quad (2-8)$$

โดยที่ $Y_G = Y_{G,G} - Y_{G,L}Y_{L,L}^{-1}Y_{L,G}$

2.4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า หรือที่รู้จักกันในชื่อ power flow ซึ่งรูปแบบของปัญหาจะเป็นการหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละสายส่ง ตลอดจนการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่ง ซึ่งในแต่ละบัสมีค่าที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

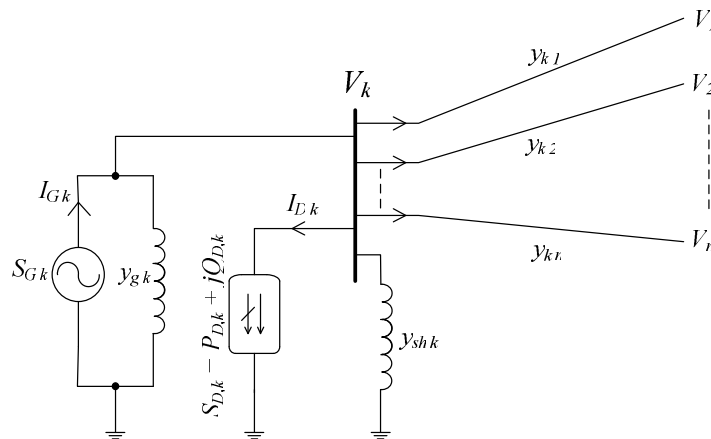
Slack bus หรือ swing bus เป็นบัสที่ค่า $|V|$ และ δ คงที่ ($|V|$ and δ are specified) ส่วน P และ Q เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

Load bus หรือ P-Q bus เป็นบัสที่ค่า P และ Q คงที่ (P and Q are specified) ส่วน $|V|$ และ δ เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

Voltage-controlled bus หรือ P-V bus เป็นบัสที่ค่า P และ V คงที่ (P and V are specified) ส่วน δ และ Q เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

2.4.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น n บัส โดยที่กำหนดให้บัสหนึ่งบัสมีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่ และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อ บัสสแลก (slack bus) และไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัส เท่านั้น



รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้การวิเคราะห์แบบโนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่โนด k ใด ๆ ดังนี้

$$y_{k,1}(V_k - V_1) + y_{k,2}(V_k - V_2) + \dots + y_{k,n}(V_k - V_n) = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2-9)$$

โดยที่ $I = yV$ จะได้

$$I_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2-10)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{G,k} - S_{D,k}}{V_k} \right)^* \quad (2-11)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (2-12)

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* \quad (2-12)$$

โดยที่ $S_{G,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k
 $S_{D,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k
 V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
 V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 $y_{k,i}$ คือ แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i
 $*$ คือ ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate)

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ กำหนดให้ $S_{sch} = P_{sch} + jQ_{sch}$, $P_{sch} = P_G - P_D$
 และ $Q_{sch} = Q_G - Q_D$ จะได้

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* = (S_{sch})^*$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{sch,k}}{V_k} \right)^* = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_k - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2-13)$$

จากการคำนวณหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$[Y_{bus}] : \quad Y_{k,k} = \sum_{i=1}^n y_{k,i} \quad \text{และ} \quad Y_{k,i} = -y_{k,i}$$

จัดรูปสมการที่ (2-13) โดยใช้ตัวแปรเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ จะได้ว่า

$$Y_{k,k} V_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2-14)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2-15)$$

จากสมการที่ (2-14) จะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (2-16)

$$V_k = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i \right\} \quad (2-16)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{(h)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h-1)})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i^{(h-1)} \right\} \quad (2-17)$$

สมการที่ (2-17) เป็นการปรับปรุงตามระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์ สำหรับระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลนั้น จะอาศัยหลักการในรอบการคำนวณใด ๆ จะดำเนินการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าจากบัสที่ 1 จนถึงบัสที่ n (ไม่รวมบัสอ้างอิง) โดยเรียงลำดับการปรับปรุงจาก 1 ไปถึง n ดังนั้น ในการคำนวณในรอบที่ $h+1$ ใด ๆ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงแรงดันที่บัส k จะพบว่าแรงดันบัสที่ 1 ถึงบัสที่ $k-1$ ได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่ได้รับการปรับปรุงของบัสที่ 1 ถึง $k-1$ (ใช้ค่าการคำนวณรอบที่ $h+1$) ในการคำนวณ ในขณะที่แรงดันบัสของบัสที่ k ถึง n ยังคงเป็นค่าที่ได้จากรอบการคำนวณก่อนหน้า (h) นั่นเอง ดังนั้นจะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลดังสมการที่ (2-18)

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2-18)$$

สมการที่ (2-18) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีการกำหนดบัสสแลก เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วยและไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัส เท่านั้น

นอกจากนี้ การใช้ตัวประกอบเร่ง γ สามารถนำมาใช้ได้กับการคำนวณด้วยวิธีนี้เพื่อเร่งอัตราการลู่เข้าให้มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น สำหรับปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าค่าตัวประกอบเร่ง γ ที่เหมาะสมนั้น มีค่าประมาณ 1.3-1.7 (ชนิดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2549) โดยกำหนดให้

$$V_{k,acc}^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2-19)$$

$$V_k^{(h+1)} = V_k^{(h)} + \gamma (V_{k,acc}^{(h+1)} - V_k^{(h)}) \quad (2-20)$$

สมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ แสดงเพียงแบบจำลองโหลดในรูปของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ในระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากแบบจำลอง โหลดในรูปกำลังไฟฟ้ายังมีแบบจำลองโหลดที่นิยมใช้อีก 2 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองโหลดในรูป กระแสไฟฟ้า (current load model) และแบบจำลองโหลดในรูปอิมพีแดนซ์ (impedance load model) สำหรับสมการที่ใช้คำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้าคำนวณ ได้จากสมการที่ (2-21) และกรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์คำนวณได้จากสมการที่ (2-22) ดังนี้

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} - I_{D,k} \right\} \quad (2-21)$$

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{\left(Y_{k,k} + \frac{1}{Z_{D,k}} \right)} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2-22)$$

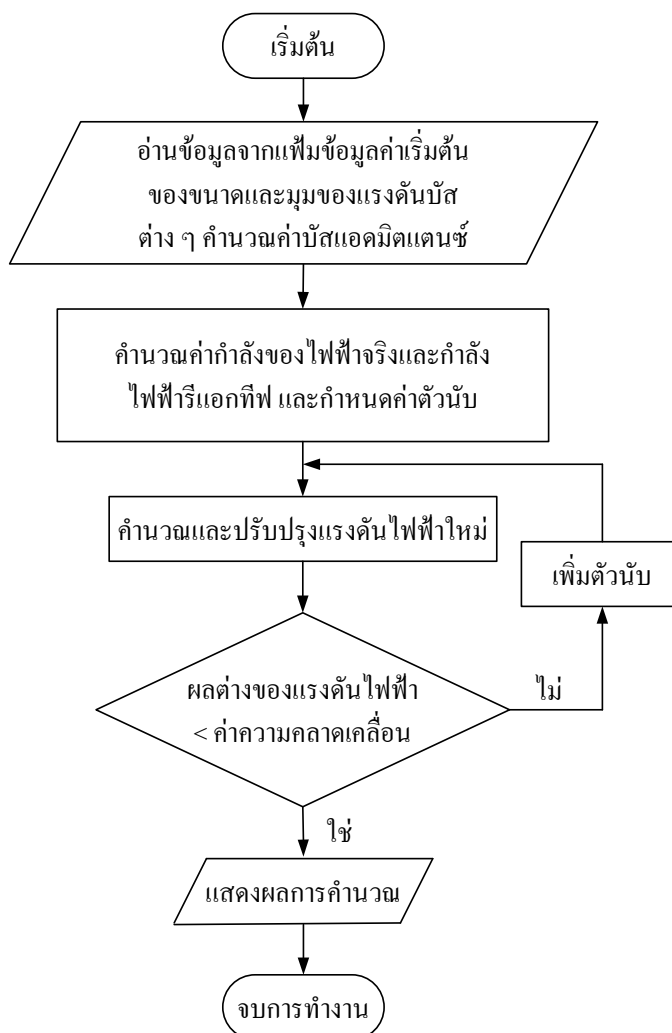
โดยที่ $I_{D,k}$ คือ โหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k

$Z_{D,k}$ คือ โหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส k

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ดังนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป
- 2) คำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)
- 3) คำนวณผลต่างของกำลังไฟฟ้าจริง ($P_G - P_D$) และผลต่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ($Q_G - Q_D$) สำหรับบัสโหลด
- 4) คำนวณแรงดันไฟฟ้าในรอบที่ $(h+1)$ ที่บัสโหลด k ใดๆ $(V_k^{(h+1)})$
- 5) คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า $\Delta|V|$ ถ้า $\Delta|V|$ มีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่
- 6) ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\text{จากสมการที่ (2-15)} \quad \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*}$$

จัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้ $S_{sch,k} = P_{sch,k} + jQ_{sch,k}$ จะได้ว่า

$$\frac{(S_{sch,k})^*}{(V_k)^*} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i$$

$$(S_{sch,k})^* = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (2-23)$$

สมการที่ (2-23) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k = |V_k| e^{j\delta_k} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส } k$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส } i$$

$$Y_{k,i} = |Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i} = |Y_{k,i}| e^{j\theta_{k,i}} \quad \text{คือ สมาชิกแถวที่ } k \text{ หลักที่ } i \text{ ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์}$$

จากสมการที่ (2-23) เมื่อพิจารณาในรูปพีคัดเชิงขั้ว จะได้ว่า

$$(S_{sch,k})^* = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^n (|Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i}) (|V_i| \angle \delta_i)$$

$$P_{sch,k} - jQ_{sch,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-24)$$

โดยที่ $P_{sch,k} = P_{G,k} - P_{D,k}$ และ $Q_{sch,k} = Q_{G,k} - Q_{D,k}$ จะได้ว่า

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-25)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันบัสที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้ จะทำให้สมการสมดุลอย่างใดก็ตาม ในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบัส ซึ่งทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นแบบราบเรียบ โดยการกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นของทุกบัสมีค่า $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. หรือใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุด

ทำงานก่อนหน้าที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบ จะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บัสขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches) ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta P_k = P_{sch,k} - P_{cal,k} = f_{p,k}$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} = f_{q,k}$$

โดยที่
$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-26)$$

$$Q_{cal,k} = -\sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-27)$$

ใช้ระเบียบวิธีการวนรอบของนิวตัน-ราฟสัน ประมาณผลเฉลยของระบบสมการในรอบการคำนวณที่ $k+1$ ใด ๆ จะได้

$$f_{p,k+1} = \Delta P_{k+1} = \Delta P_k + [\nabla f_{p,k}]^T \cdot \Delta X = 0$$

$$\Delta P_k = -[\nabla f_{p,k}]^T \cdot \Delta X$$

โดยที่ $X = [\delta \quad |V|]^T$ จะได้

$$\Delta P_k = -\left(\frac{\partial f_{p,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial f_{p,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \right)$$

เนื่องจาก $P_{sch,k}$ มีค่าคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า $\frac{\partial f_{p,k}}{\partial X} = -\frac{\partial P_{cal,k}}{\partial X}$ นั่นคือ

$$\Delta P_k = \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2-28)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2-29)$$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์ สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดัน ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน
หรือ Mismatches (power) = Jacobian $\times$ Corrections (voltage) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{cal}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{cal}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J1 & \vdots & \vdots & \vdots & J2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J3 & \vdots & \vdots & \vdots & J4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

ถ้าให้บัสที่ m เป็นบัสหลัก จากสมการที่ (2-30) หลักที่ $k = m$ และแถวที่ $k = m$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนได้ดังนี้

เมตริกซ์ย่อย J_1 : จากสมการที่ (2-26)

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-31)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-32)$$

เมตริกซ์ย่อย J_2 : จากสมการที่ (2-26)

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|Y_{k,k} V_k| \cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-33)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |Y_{k,i} V_k| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-34)$$

เมตริกซ์ย่อย J_3 : จากสมการที่ (2-27)

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-35)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-36)$$

เมตริกซ์ย่อย J_4 : จากสมการที่ (2-27)

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|Y_{k,k}V_k|\sin(\theta_{k,k}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_i|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-37)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|Y_{k,i}V_k|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-38)$$

จากสมการที่ (2-30) สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ $h+1$ โดยคำนวณเมตริกซ์ผกผันจาโคเบียน จะได้

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{-1(h)} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(h)}$$

การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ หรือ $\max(|P_{mis,max}|, |Q_{mis,max}|) < \varepsilon_{tol}$

การคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน $J1$ - $J4$ ที่ได้แสดงไปแล้วข้างต้นนั้นใช้สำหรับกรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้าและแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์นั้นสามารถคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน $J1$ - $J4$ ได้ดังนี้

กำหนดนิยามเพิ่มเติมดังนี้

$$I_{D,k} = |I_{D,k}| \angle \phi_{D,k} = |I_{D,k}| e^{j\phi_{D,k}} \quad \text{คือ โหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส } k$$

$$Z_{D,k} = |Z_{D,k}| \angle \beta_{D,k} = |Z_{D,k}| e^{j\beta_{D,k}} \quad \text{คือ โหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส } k$$

1) แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

เมตริกซ์ย่อย $J1$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_kV_i|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) + |V_kI_{D,k}|\sin(\phi_{D,k} - \delta_k) \quad (2-39)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i}V_kV_i|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-40)$$

เมตริกซ์ย่อย $J2$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|Y_{k,k}V_k|\cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_i|\cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) + |I_{D,k}|\cos(\phi_{D,k} - \delta_k) \quad (2-41)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |Y_{k,i}V_k|\cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-42)$$

เมตริกซ์ย่อย $J3$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_kV_i|\cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) + |V_kI_{D,k}|\cos(\phi_{D,k} - \delta_k) \quad (2-43)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i}V_kV_i|\cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-44)$$

เมตริกซ์ย่อย $J4$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|Y_{k,k}V_k|\sin(\theta_{k,k}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_i|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) - |I_{D,k}|\sin(\phi_{D,k} - \delta_k) \quad (2-45)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|Y_{k,i}V_k|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-46)$$

2) แบบจำลองโพลดิอิมพีแคนซ์

เมตริกซ์ย่อย $J1$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-47)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-48)$$

เมตริกซ์ย่อย $J2$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2 \left| \frac{Y_{k,k} V_k}{Z_{D,k}} \right| \cos(\theta_{k,k} - \beta_{D,k}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-49)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |Y_{k,i} V_k| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-50)$$

เมตริกซ์ย่อย $J3$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-51)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-52)$$

เมตริกซ์ย่อย J_4

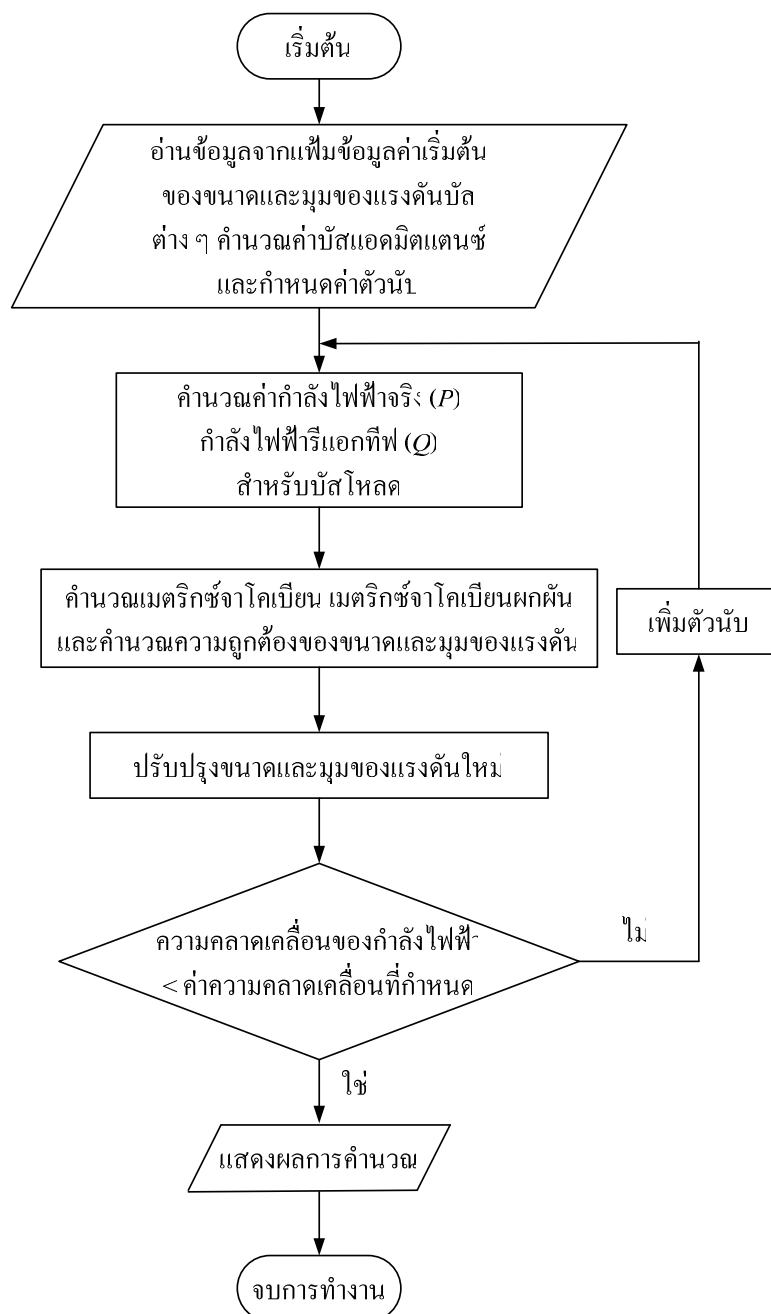
$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2 \left| \frac{Y_{k,k} V_k}{Z_{D,k}} \right| \sin(\theta_{k,k} - \beta_{D,k}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-53)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|Y_{k,i} V_k| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2-54)$$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป
- 2) คำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)
- 3) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด
- 4) คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ J_1 - J_4
- 5) คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ ทุกบัส
- 6) คำนวณ δ และ $|V|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ กับค่าเก่า
- 7) ตรวจสอบค่า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่
- 8) ถ้า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี
นิวตัน-ราฟสัน ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.3

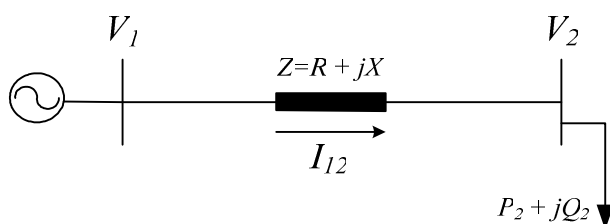


รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.5 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power distribution systems)

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลาง สำหรับประเทศไทยมี 2 ระดับด้วยกัน คือ 22 kV เป็นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ 24 kV เป็นของการไฟฟ้านครหลวง ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายโครงสร้าง แต่โดยทั่วไประบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีโครงสร้างเป็นแบบรัศมี (radial feed configuration) เป็นโครงสร้างที่รับไฟจากแหล่งเดียวผ่านสายส่งชุดใดชุดหนึ่ง มีประโยชน์ คือ กระแสผิดพลาดมีขนาดน้อยที่สุด ลดราคาของอุปกรณ์ควบคุม และง่ายต่อการป้องกันระบบ แต่มีข้อเสีย คือ มีความน่าเชื่อถือในการจ่ายไฟต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของระบบที่เป็นแบบรัศมีทำให้การตัดแปลงระบบจำหน่ายทำได้โดยการเปิดปิดสวิตช์โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ลดกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้า และระบบสามารถจ่ายโหลดได้อย่างสมดุล ดังปรากฏใน Baran, and Wu (1989) โดยทั่วไประบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นสายส่งที่มีระยะสั้นผลจากความจุไฟฟ้าของสายส่งจะมีค่าน้อยมาก ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการคำนวณเมื่อไม่คิดผลของความจุไฟฟ้าจึงน้อยด้วยเช่นกัน ดังนั้น แบบจำลองสายส่งระยะสั้นจึงถูกนำมาใช้วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ดังปรากฏใน Salama, and Chikhani (1993), Sharaf, and Ibrahim (1996), and Prakash, and Sydulu (2007)

เมื่อคำนวณผลเฉลยแรงดันบัสเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง เพื่อดูการกระจายของการไหลของกำลังไฟฟ้าว่ามีทิศทางไปในทางใดและเป็นปริมาณเท่าใด กำลังงานสูญเสียในสายส่ง ตลอดจนแรงดันตกเป็นเท่าไร คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ระบบทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดและประหยัด (ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2549)



รูปที่ 2.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 บัส

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 2.4 กำลังงานสูญเสียในสายส่งของระบบไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการ $S_{loss} = P_{loss} + jQ_{loss} = (I_{12})^2 Z$ โดยกำลังงานสูญเสียประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ กำลังงานสูญเสียแอกทิฟ P_{loss} และกำลังงานสูญเสียรีแอกทิฟ Q_{loss} ดังนี้

$$P_{loss} = (I_{12})^2 R = \left(\frac{V_1 - V_2}{Z} \right)^2 R \quad (2-55)$$

$$Q_{loss} = (I_{12})^2 X = \left(\frac{V_1 - V_2}{Z} \right)^2 X \quad (2-56)$$

โดยทั่วไปแล้วฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเป็นกำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ที่โหลด กำลังงานชนิดนี้ก็คือ กำลังเฉลี่ย (average power) นั่นเอง ซึ่งต่างจากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่นชั่วคราวเท่านั้น โดยที่ค่าเฉลี่ยในหนึ่งวัฏจักรเท่ากับศูนย์ หรืออาจกล่าวได้ว่า กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า ถ้าความต้องการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมีมากขึ้นเท่าใด ค่าเชื้อเพลิงก็จะมากตามไปด้วย ดังนั้น กำลังไฟฟ้าแอกทีฟจึงมีความสำคัญในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทำให้การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปมุ่งไปที่การลดกำลังงานสูญเสียแอกทีฟมากกว่ากำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ ดังปรากฏใน Haque (1999), and AlHajri, AlRashidi, and El Hawary (2007) แต่ผลที่ได้จากการลดกำลังงานสูญเสียไฟฟ้าแอกทีฟก็คือกำลังสูญเสียไฟฟ้ารีแอกทีฟจะลดลงด้วย จากสมการที่ (2-55) พบว่าตัวแปรที่สำคัญได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่บัสรับและบัสส่ง ถ้าสามารถทำให้แรงดันที่บัสมีความแตกต่างกันน้อยได้เท่าไร กำลังงานสูญเสียในระบบจะลดลงได้มากตามไปด้วย ถ้าหากกำลังงานสูญเสียแอกทีฟมีค่าลดลงจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายมีค่าลดลงทำให้ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงลดลงเช่นกัน โดยแนวทางดังกล่าวสามารถทำได้โดยการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

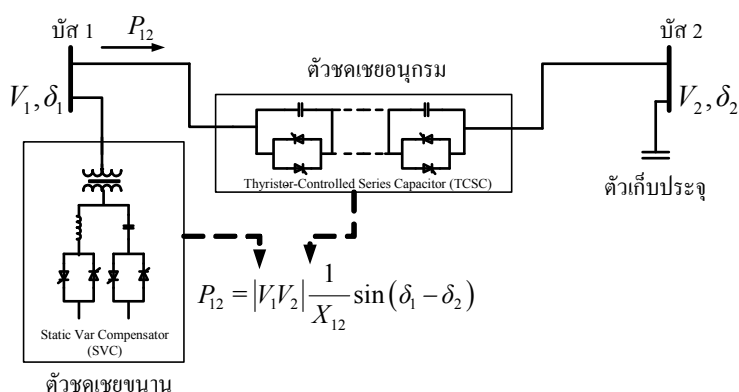
2.6 การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power compensation)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อลดกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังงานสูญเสียและแรงดันตกในระบบ ดังนั้น การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อชดเชยความต้องการของโหลดและชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียต่ำและระดับแรงดันตกมีค่าลดลง (ธนัชชัย กุลารวานิชพงษ์, 2549) นอกจากนี้การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟยังช่วยเพิ่มขีดจำกัดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของสายส่งให้มีความสูงขึ้นด้วย การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุกรม รูปแบบขนาน และรูปแบบผสม สำหรับตัวชดเชยในที่นี้จะกล่าวถึงตัวชดเชยในรูปแบบอนุกรมและรูปแบบขนาน

เท่านั้น ตัวชดเชยที่จะกล่าวถึงจัดอยู่ในตระกูล Flexible AC Transmission Systems หรือเรียกย่อ ๆ ว่า FACTS และตัวเก็บประจุ ตัวชดเชยที่กล่าวมาจะมีหน้าที่และวิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) การชดเชยแบบอนุกรม (series compensation)

ตัวชดเชยแบบอนุกรมของอุปกรณ์ FACTS มีหลายชนิด ได้แก่ Dynamic Voltage Restorer (DVR), Static Synchronous Series Compensator (SSSC), Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) ตัวชดเชยทั้งสามมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือ DVR และ SSSC จะใช้การสวิตช์แบบ converter ในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แต่ TCSC จะใช้ไทรสเตอร์เป็นสวิตช์ที่ละตัว จากรูปที่ 2.5 ตัวชดเชยแบบอนุกรมจะต่อระหว่างบัสโหลดที่ต้องการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่กับสายส่งเป็นต้นเหตุของแรงดันตกคร่อมในสายส่ง ดังนั้น เมื่อทำการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม อิมพีแดนซ์ของตัวชดเชยจะอนุกรมกับสายส่งทำให้อิมพีแดนซ์รวมของสายส่งลดลงและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีขนาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 แบบแผนพื้นฐานไทรสเตอร์ของตัวควบคุม FACTS

2) การชดเชยแบบขนาน (shunt compensation)

ตัวชดเชยแบบขนานของอุปกรณ์ FACTS มีหลายชนิด ได้แก่ Static Var Compensator (SVC), Static Synchronous Compensator (STATCOM) ตัวชดเชยทั้งสองมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือ SVC จะใช้ไทรสเตอร์เป็นสวิตช์ที่ละตัวแต่ STATCOM จะใช้การสวิตช์แบบ converter ในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งสองตัวสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ทั้งบวกและลบ (มีทั้ง C และ L) ขึ้นอยู่กับสถานะของโหลดหรือแรงดัน ณ บัสที่ทำการติดตั้ง จากรูปที่ 2.5 ตัวชดเชยแบบขนานจะต่อเข้ากับบัสที่ต้องการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทำให้แรงดันที่บัสสูงขึ้นและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีขนาดเพิ่มขึ้น

3) การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor compensation)

ตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยอีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งมีค่ามากขึ้นหรือช่วยเพิ่มขีดจำกัดของสายส่ง การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุสามารถทำได้ทั้งรูปแบบอนุกรมและรูปแบบขนาน การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับสายส่ง มีจุดประสงค์เพื่อชดเชยค่า X_L ที่มีอยู่ในสายส่งเส้นนั้น ๆ การต่อลักษณะนี้จะทำให้ค่า X_C ไปชดเชยกับ X_L ของสายส่ง ส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมในสายส่งมีค่าลดลง ทำให้แรงดันที่บัสรับมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งยังไม่มีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังที่บัสรับอีกด้วย แต่การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้าไปในสายส่งอาจก่อให้เกิดปัญหาบางประการที่เรียกว่า subsynchronous resonance ซึ่งทำให้กระแสมีค่าสูงกว่าปกติและอาจเกิดผลเสียหายต่อระบบได้ สำหรับการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบขนานกับสายส่งเป็นที่นิยมมากในระบบไฟฟ้าย่อย การต่อในลักษณะนี้ตัวเก็บประจุจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับโหลดจำพวก Inductive load ซึ่งจะคล้ายกับการทำงานของ Synchronous Generator ที่ทำการกระตุ้นด้วย Over-excitation ทำให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายมีค่าลดลง แรงดันในระบบโดยรวมมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลงไปด้วย

นอกจากปัญหาเรื่องการเลือกชนิดของอุปกรณ์ชดเชยเพื่อให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแล้ว การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมยังคงเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจมากเช่นกัน โดยทั่วไปในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตำแหน่งการติดตั้งมักเลือกที่สถานี เนื่องจากง่ายต่อการดูแลและบำรุงรักษา แต่สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ตำแหน่งติดตั้งยังคงเป็นปัญหาเปิด คือสามารถติดตั้งที่ตำแหน่งใดก็ได้ไม่ว่าจะเป็นที่บัสโหลดหรือแม้แต่วางระหว่างสายส่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการชดเชยดังกล่าวด้วย

2.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึงแบบจำลองการกำจัดโหลด การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลและนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ไม่ได้พิจารณาผลของการเพิ่มโหลดหรือการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ากับกำลังงานสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาผลของตำแหน่งและปริมาณการเพิ่มโหลดเข้าไปในระบบ จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า

3.1 บทนำ

ปัญหาการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องทำให้การคำนวณสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธี แต่ยังไม่ได้พิจารณาเรื่องการต่อเชื่อมโหลดและการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยต่าง ๆ เข้าไปยังระบบ การคำนวณโดยทั่วไปจะเน้นไปที่หลักการพื้นฐานเท่านั้น

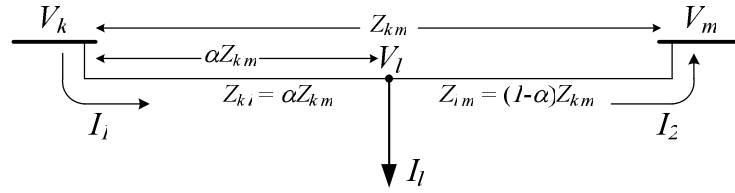
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคการถ่ายโอนโหลดในระบบไฟฟ้า ประกอบด้วยแบบจำลองโหลด 3 ประเภท คือ แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า โหลดอิมพีแดนซ์ และโหลดกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัว ลำดับต่อมาได้นำเสนอการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอกับวิธีมาตรฐาน และกล่าวถึงเทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานในสถานะคงตัว 3 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM

3.2 เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (load transfer technique)

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนสูง เนื่องจากการต่อเชื่อมโหลดและการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในบางกรณีเป็นการเพิ่มบัสใหม่ให้ระบบ ทำให้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้ง การคำนวณผลเฉลยของการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีนี้มีความยุ่งยาก ทั้งต่อผู้ควบคุมระบบ และปัญหาเรื่องการลู่เข้า แบบจำลองโหลดที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปมี 3 ชนิด คือ แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และกำลังไฟฟ้า เทคนิคการถ่ายโอนโหลดมีหลักการดังนี้

3.2.1 แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า (current load model)

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.1 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส k อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการต่อเชื่อมโหลดกระแสไฟฟ้าเข้าในระบบ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะนี้จะมีตัวแปรเพิ่มเข้ามาอีกหลายตัวแปรและความยุ่งยากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ง่ายขึ้นถ้าบัสเสริม k ในระบบถูกกำจัดออกไป ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเทคนิคการถ่ายโอนโหลดที่บัสเสริมให้ไปอยู่ที่บัสข้างเคียงโดยมีหลักการดังนี้



รูปที่ 3.1 บัส l ที่มีโหลดกระแสไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่

จากรูปที่ 3.1 วิเคราะห์โดยใช้ KVL และ KCL จะได้ว่า

$$\text{Loop } I_1: V_k - V_l = Z_{k,l} I_1 \quad (3-1)$$

$$\text{Loop } I_2: V_l - V_m = Z_{l,m} I_2 \quad (3-2)$$

นำสมการที่ (3-1) บวกกับสมการที่ (3-2) จะได้

$$V_k - V_m = Z_{k,l} I_1 + Z_{l,m} I_2 \quad (3-3)$$

โดยที่ $I_1 = I_2 + I_l$ และ $I_2 = I_1 - I_l$

กำจัด I_2 โดยการแทนค่า $I_2 = I_1 - I_l$ ในสมการที่ (3-3) จะได้ว่า

$$V_k - V_m = Z_{k,l} I_1 + Z_{l,m} (I_1 - I_l) = (Z_{k,l} + Z_{l,m}) I_1 - Z_{l,m} I_l$$

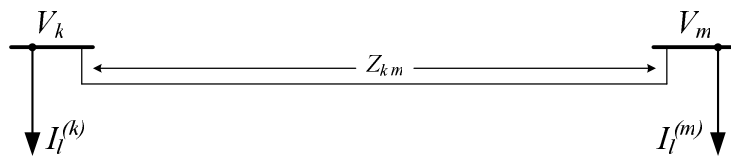
$$I_1 = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l + \left(\frac{V_k - V_m}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \quad (3-4)$$

กำจัด I_1 โดยการแทนค่า $I_1 = I_2 + I_l$ ในสมการที่ (3-3) จะได้ว่า

$$V_k - V_m = Z_{k,l} (I_2 + I_l) + Z_{l,m} I_2 = (Z_{k,l} + Z_{l,m}) I_2 + Z_{k,l} I_l$$

$$I_2 = -\left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}}\right)I_l + \left(\frac{V_k - V_m}{Z_{k,l} + Z_{l,m}}\right) \quad (3-5)$$

แบบจำลองการย้ายโหลดกระแสไฟฟ้าที่บัสเสริม l ใด ๆ ในรูปที่ 3.1 ไปยังบัสข้างเคียง สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการย้ายโหลดกระแสไฟฟ้าจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m

จากรูปที่ 3.2 โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด จะได้ว่า

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}}\right)I_l \quad (3-6)$$

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}}\right)I_l \quad (3-7)$$

การหาแรงดันที่บัส l หาได้ดังนี้

จากสมการที่ (3-1) จะได้ว่า

$$I_1 = \frac{V_k - V_l}{Z_{k,l}} \quad (3-8)$$

แทนค่า $I_2 = I_1 - I_l$ ลงในสมการที่ (3-2) และจัดรูปสมการ จะได้

$$I_1 = \frac{V_l - V_m}{Z_{l,m}} + I_l \quad (3-9)$$

แทนค่า I_l จากสมการที่ (3-9) ลงในสมการที่ (3-8) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_l}{Z_{l,m}} - \frac{V_m}{Z_{l,m}} + I_l &= \frac{V_k}{Z_{k,l}} - \frac{V_l}{Z_{k,l}} \\ \left(\frac{Z_{k,l} + Z_{l,m}}{Z_{k,l}Z_{l,m}} \right) V_l &= \frac{V_k}{Z_{k,l}} + \frac{V_m}{Z_{l,m}} - I_l \\ V_l &= \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m - \left(\frac{Z_{k,l}Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \end{aligned} \quad (3-10)$$

จากสมการที่ (3-6), (3-7) และ (3-10) เขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการนำไปใช้ ได้ตามสมการที่ (3-11), (3-12) และ (3-13) ตามลำดับ

$$I_l^{(k)} = (1 - \alpha) I_l \quad (3-11)$$

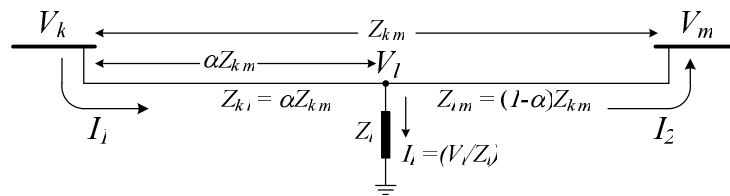
$$I_l^{(m)} = \alpha I_l \quad (3-12)$$

$$V_l = V_k - \alpha (V_k - V_m + (1 - \alpha) Z_{k,m} I_l) \quad (3-13)$$

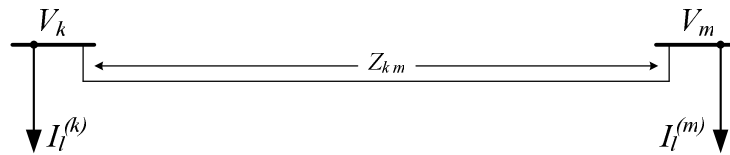
โดยที่ α คือ ดัชนีระบุตำแหน่งของบัสเสริมในสายส่ง มีค่าระหว่าง 0-1.0
 $Z_{k,m}$ คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งระหว่างบัส k และ m
 I_l คือ โหลดกระแสไฟฟ้าที่บัสเสริม l
 V_l คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสเสริม l
 V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
 V_m คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส m

3.2.2 แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ (impedance load model)

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.3 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส l เป็นบัสเสริมที่เกิดจากการต่อเชื่อมโหลดอิมพีแดนซ์เข้าในระบบ โดยใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า สำหรับแบบจำลองการย้ายโหลดอิมพีแดนซ์ที่บัสเสริม l ใด ๆ ในรูปที่ 3.3 ไปยังบัสข้างเคียง สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 บัส l ที่มีโหลดอิมพีแดนซ์ต่อเชื่อมอยู่



รูปที่ 3.4 แบบจำลองการย้ายโหลดอิมพีแดนซ์จากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m

แทนค่า $I_l = (V_l / Z_l)$ ลงในสมการที่ (3-6) และ (3-7) จะได้

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{V_l}{Z_l} \right) \quad (3-14)$$

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{V_l}{Z_l} \right) \quad (3-15)$$

แรงดันที่บัส l หาได้โดยการแทนค่า $I_l = (V_l / Z_l)$ ลงในสมการที่ (3-10) จะได้ว่า

$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m - \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{V_l}{Z_l} \right)$$

จัดรูปสมการ จะได้

$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m} Z_l}{Z_{k,m} Z_l + Z_{k,l} Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l} Z_l}{Z_{k,m} Z_l + Z_{k,l} Z_{l,m}} \right) V_m \quad (3-16)$$

แทนค่า V_l จากสมการที่ (3-16) ลงในสมการที่ (3-14) และจัดรูปสมการ จะได้

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,m} Z_l + Z_{k,l} Z_{l,m}} \right) (Z_{l,m} V_k + Z_{k,l} V_m)$$

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_T} \right) (Z_{l,m} V_k + Z_{k,l} V_m) \quad (3-17)$$

โดยที่ $Z_T = Z_{k,m}^2 Z_l + Z_{k,m} Z_{k,l} Z_{l,m}$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับ $I_l^{(m)}$ จะได้

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_T} \right) (Z_{l,m} V_k + Z_{k,l} V_m) \quad (3-18)$$

สมการที่ (3-14) และ (3-15) เป็นสมการสำหรับใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข ส่วนสมการที่ (3-17) และ (3-18) เป็นสมการที่ได้จากการแทนค่าโดยตรง จากสมการที่ (3-17), (3-18) และ (3-16) เขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการนำไปใช้ ได้ตามสมการที่ (3-19), (3-20) และ (3-21) ตามลำดับ

$$I_l^{(k)} = \frac{(1-\alpha)}{\beta} (V_k - \alpha(V_k - V_m)) \quad (3-19)$$

$$I_l^{(m)} = \frac{\alpha}{\beta} (V_k - \alpha(V_k - V_m)) \quad (3-20)$$

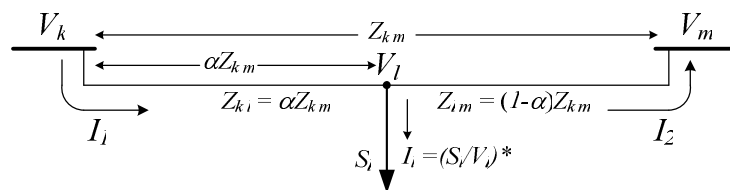
$$V_l = \frac{Z_l}{\beta} (V_k - \alpha(V_k - V_m)) \quad (3-21)$$

โดยที่ Z_l คือ โหลดอิมพีแดนซ์ที่โนดเสริม l

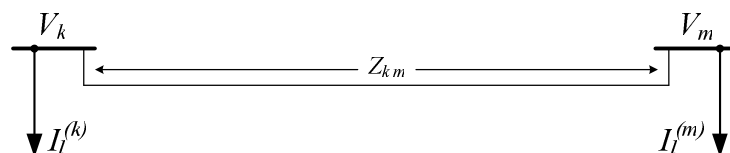
$$\beta = Z_l + (\alpha - \alpha^2) Z_{k,m}$$

3.2.3 แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า (power load model)

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.5 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส l เป็น บัสเสริมที่เกิดจากการต่อเชื่อมโหลดกำลังไฟฟ้าเข้าในระบบ โดยใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า สำหรับแบบจำลองการย้ายโหลดกำลังไฟฟ้าที่บัสเสริม l ใด ๆ ในรูปที่ 3.5 ไปยังบัสข้างเคียง สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 บัส l ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการย้ายโหลดกำลังไฟฟ้าจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m

แทนค่า $I_l = (S_l / V_l)^*$ ลงในสมการที่ (3-6) และ (3-7) จะได้

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-22)$$

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-23)$$

แรงดันที่บัส l หาได้โดยการแทนค่า $I_l = (S_l / V_l)^*$ ลงในสมการที่ (3-10) จะได้

$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m - \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-24)$$

เนื่องจากไม่สามารถจัดรูปสมการให้แยกกันได้อย่างอิสระ ดังนั้น ในการคำนวณ จะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับแรงดันที่บัส l ใด ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณในรอบต่อไป ดังนั้น จะได้ว่า

$$V_l^{(h+1)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m - \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l^{(h)}} \right)^* \quad (3-25)$$

จากสมการที่ (3-22), (3-23) และ (3-25) เขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการนำไปใช้ได้ ตามสมการที่ (3-26), (3-27) และ (3-28) ตามลำดับ

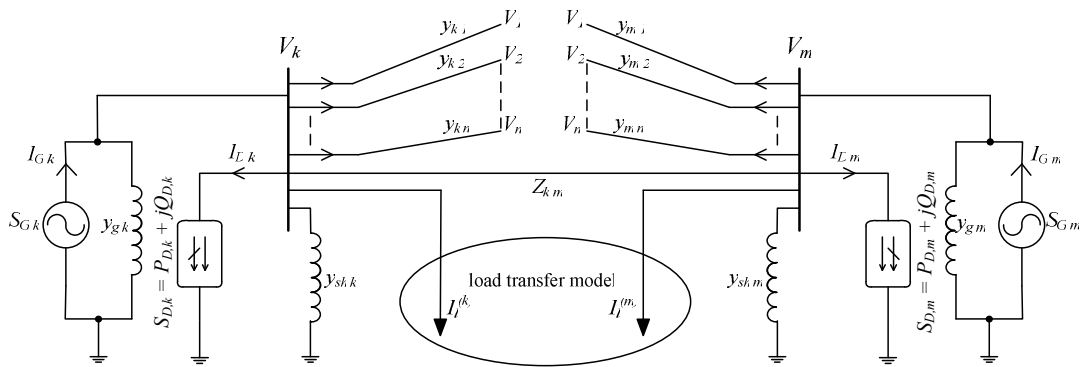
$$I_l^{(k)} = (1 - \alpha) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-26)$$

$$I_l^{(m)} = \alpha \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-27)$$

$$V_l^{(h+1)} = V_k - \alpha \left\{ V_k - V_m + (1 - \alpha) Z_{k,m} \left(\frac{S_l}{V_l^{(h)}} \right)^* \right\} \quad (3-28)$$

3.3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

หัวข้อนี้นำเสนอวิธีการคำนวณผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด หลักการนี้ใช้เทคนิคการกำจัดบัสเสริมที่เพิ่มเข้ามาในระบบโดยการถ่ายโอนไปอยู่ที่บัสข้างเคียงที่มีอยู่เดิม ทำให้จำนวนสมการไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.7 บัส k และบัส m เมื่อมีการถ่ายโอนโหลดในระบบไฟฟ้า

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้การวิเคราะห์แบบโนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่โนด k ใด ๆ ดังนี้

$$y_{k,1}(V_k - V_1) + y_{k,2}(V_k - V_2) + \dots + y_{k,n}(V_k - V_n) = I_{G,k} - I_{D,k} - I_l^{(k)} \quad (3-29)$$

โดยที่ $I = yV$ จะได้

$$I_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}(V_k - V_i) = I_{G,k} - I_{D,k} - I_l^{(k)} \quad (3-30)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{G,k} - S_{D,k}}{V_k} \right)^* - I_l^{(k)} \quad (3-31)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (3-32)

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* - (V_k)^* I_l^{(k)} \quad (3-32)$$

โดยที่ $S_{G,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k

$S_{D,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k

V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k

V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i

$y_{k,i}$ คือ แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i

$*$ คือ ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate)

$I_l^{(k)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนจากบัส l ไปยังบัส k

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ กำหนดให้ $S_{sch} = P_{sch} + jQ_{sch}$, $P_{sch} = P_G - P_D$

และ $Q_{sch} = Q_G - Q_D$ จะได้

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* - (V_k)^* I_l^{(k)} = (S_{sch})^*$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{sch,k}}{V_k} \right)^* - I_l^{(k)} = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_k - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)} \quad (3-33)$$

จากการคำนวณหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$[Y_{bus}] : \quad Y_{k,k} = \sum_{i=1}^n y_{k,i} \quad \text{และ} \quad Y_{k,i} = -y_{k,i}$$

จัดรูปสมการที่ (3-33) โดยใช้ตัวแปรเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ จะได้ว่า

$$Y_{k,k}V_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)} \quad (3-34)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i}V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)} \quad (3-35)$$

จากสมการที่ (3-34) จะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (3-36)

$$V_k = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}V_i - I_l^{(k)} \right\} \quad (3-36)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{(h)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h-1)})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}V_i^{(h-1)} - I_l^{(k)} \right\} \quad (3-37)$$

สมการที่ (3-37) เป็นการปรับปรุงตามระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์ สำหรับระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลนั้น จะอาศัยหลักการในรอบการคำนวณใด ๆ จะดำเนินการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าจากบัสที่ 1 จนถึงบัสที่ n (ไม่รวมบัสอ้างอิง) โดยเรียงลำดับการปรับปรุงจาก 1 ไปถึง n ดังนั้น ในการคำนวณในรอบที่ $h+1$ ใด ๆ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงแรงดันที่บัส k จะ

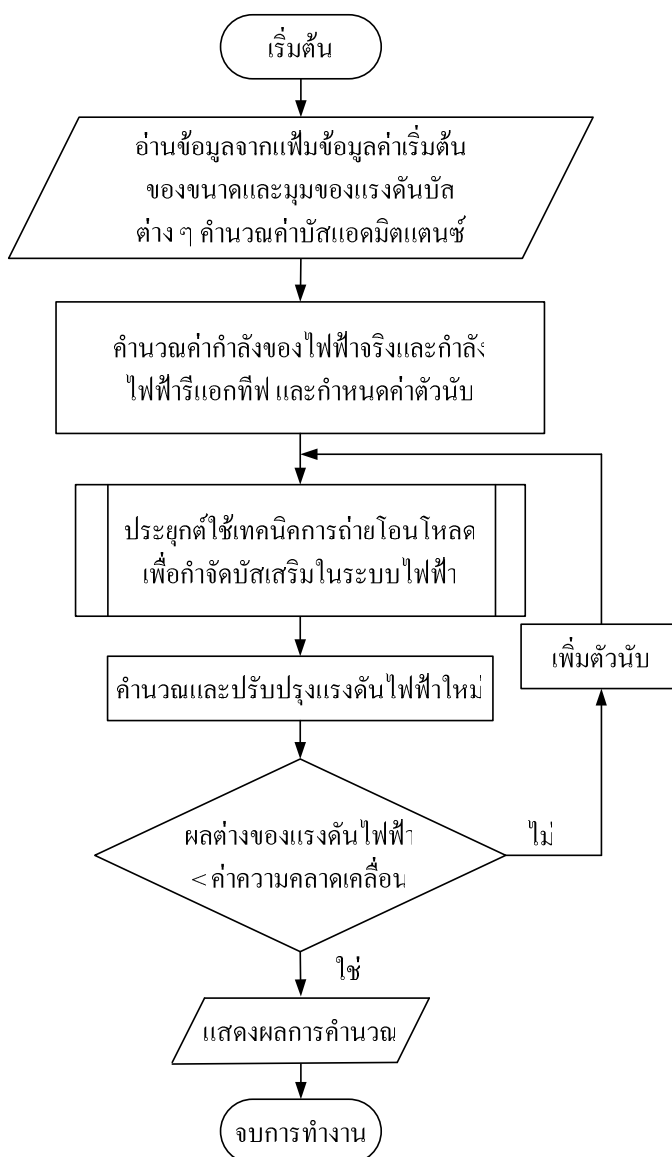
พบว่าแรงดันบัสที่ 1 ถึงบัสที่ $k-1$ ได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่ได้รับการปรับปรุงของบัสที่ 1 ถึง $k-1$ (ใช้ค่าการคำนวณรอบที่ $h+1$) ในการคำนวณ ในขณะที่แรงดันบัสของบัสที่ k ถึง n ยังคงเป็นค่าที่ได้จากรอบการคำนวณก่อนหน้า (h) นั่นเอง ดังนั้น จะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลที่บัส k ดังสมการที่ (3-38)

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} - I_l^{(k)} \right\} \quad (3-38)$$

สำหรับบัส m จะได้

$$V_m^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{m,m}} \left\{ \frac{P_{sch,m} - jQ_{sch,m}}{(V_m^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{m-1} Y_{m,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=m+1}^n Y_{m,i} V_i^{(h)} - I_l^{(m)} \right\} \quad (3-39)$$

สมการที่ (3-38) และ (3-39) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีการกำหนดบัสสแลก เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วยและไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัสเท่านั้น แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล
ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหนด

3.4 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของตำแหน่งติดตั้งโหนดกับคุณสมบัติการดูเข้าของผลเฉลย และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของจำนวนการเพิ่มโหนดกับคุณสมบัติการดูเข้าของผลเฉลย โดยทั้ง 2 ส่วนทดสอบกับระบบทดสอบ 15 บัส และ 34 บัส โดยระบบทดสอบทั้งสองเป็นระบบทดสอบ สายป้อนแบบ 3 เฟสสมดุล ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. การทดสอบจะแสดงการ

เปรียบเทียบจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณระหว่างการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลมาตรฐาน (SGSPF) และการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด (TGSPF) โดยใช้แบบจำลองโหลด 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และกำลังไฟฟ้า การทดสอบได้กำหนดเงื่อนไขการหยุดไว้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันมีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 1×10^{-6} p.u. ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบทุกกรณี สำหรับจุดเริ่มต้นของการคำนวณได้ใช้จุดเริ่มต้นเดียวกันสำหรับการคำนวณทั้ง 2 วิธี โดยกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นมีค่า $1.00 + j0.00$ p.u. สำหรับทุกบัส ผลทดสอบเป็นดังนี้

ส่วนที่ 1 ผลของตำแหน่งติดตั้งกับคุณสมบัติการเข้าสู่ของผลเฉลย

สำหรับส่วนที่ 1 ทำการทดสอบโดยติดตั้งโหลดเพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดยติดตั้งโหลดที่สายส่งระหว่างบัส 2 บัสซึ่งทำให้เกิดบัสเสริมขึ้น แล้วแปรค่าตำแหน่งติดตั้งจากต้นสายส่ง (ที่ระยะ 10% ของความยาวสายส่ง) ไปจนถึงปลายของสายส่ง (ที่ระยะ 90% ของความยาวสายส่ง) เพื่อดูผลของตำแหน่งการติดตั้งโหลดกับการเข้าสู่ของผลเฉลย ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทของโหลดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ

ระบบทดสอบ	โหลดติดตั้งระหว่างบัส	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
15 บัส	3 – 4	$10 - j11$	$600 + j700$	$80 + j90$
34 บัส	19 – 20	$18 - j15$	$1500 + j1200$	$200 + j150$

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 15 บัส เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกระแสไฟฟ้าขนาด $10 - j11$ A ระหว่างบัสที่ 3 และ 4 แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 สำหรับวิธี SGSPF เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดอยู่ใกล้บัสต้นของสายส่ง (ตำแหน่ง 10% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่ามาก และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง (ตำแหน่ง 50% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสปลายของสายส่ง (ตำแหน่ง 90% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 424 รอบ และ 0.1698 วินาที ตามลำดับ เมื่อตำแหน่งติดตั้งโหลดเข้าใกล้บัสที่ 4 สำหรับวิธี TGSPF

ตำแหน่งการเพิ่มโหลดแทบไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจาก 171 รอบ เป็น 172 รอบ เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสที่ 4 จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 172 รอบ และ 0.0661 วินาที ตามลำดับ ส่วนผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์ขนาด $600 + j700 \Omega$ ระหว่างบัสที่ 3 และ 4 แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ผลที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยในการคำนวณมากขึ้น เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสเดิมในระบบ จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 415 รอบ และ 0.1658 วินาที ตามลำดับ สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่มโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าขนาด $80 + j90 \text{ kVA}$ ระหว่างบัสที่ 3 และ 4 แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ผลที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ โดยวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยในการคำนวณมากขึ้น เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสเดิมในระบบ จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 419 รอบ และ 0.1694 วินาที ตามลำดับ สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่มโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SGSPF

ตารางที่ 3.2 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	
10%	365	171	0.1469	0.0642	2.2882
20%	275	171	0.1089	0.0646	1.6858
30%	248	171	0.0967	0.0645	1.4992
40%	238	171	0.0932	0.0644	1.4472
50%	237	171	0.0925	0.0645	1.4341
60%	243	171	0.0965	0.0649	1.4869
70%	261	172	0.1038	0.0654	1.5872
80%	300	172	0.1205	0.0656	1.8369
90%	424	172	0.1698	0.0661	2.5688

ตารางที่ 3.3 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
10%	359	169	0.1432	0.0636	2.2516
20%	270	169	0.1057	0.0633	1.6698
30%	244	169	0.0935	0.0617	1.5154
40%	234	169	0.0918	0.0612	1.5000
50%	233	169	0.0911	0.0614	1.4837
60%	239	169	0.0941	0.0626	1.5032
70%	256	169	0.1045	0.0631	1.6561
80%	295	169	0.1149	0.0626	1.8355
90%	415	169	0.1658	0.0621	2.6699

ตารางที่ 3.4 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
10%	361	170	0.1414	0.0641	2.2059
20%	272	170	0.1031	0.0646	1.5960
30%	245	170	0.0956	0.0649	1.4730
40%	236	170	0.0912	0.0626	1.4569
50%	235	170	0.0908	0.0639	1.4210
60%	241	170	0.0929	0.0642	1.4470
70%	258	170	0.1021	0.0630	1.6206
80%	297	170	0.1180	0.0639	1.8466
90%	419	170	0.1694	0.0636	2.6635

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 34 บัส เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกระแสไฟฟ้าขนาด $18 - j15$ A ระหว่างบัสที่ 19 และ 20 แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 สำหรับวิธี SGSPF เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดอยู่ใกล้บัสต้นของสายส่ง (ตำแหน่ง 10% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่ามากและจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง (ตำแหน่ง 50% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้ปลายของสายส่ง (ตำแหน่ง 90% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 1278 รอบ และ 1.6813 วินาที ตามลำดับ เมื่อตำแหน่งติดตั้งโหลดเข้าใกล้บัสที่ 20 สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่มโหลดมีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยมาก โดยจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจาก 974 รอบ เป็น 975 รอบเมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสที่ 20 จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 975 รอบ และ 1.1825 วินาที ตามลำดับ ส่วนผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบโดยใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์ขนาด $1500 + j1200$ Ω ระหว่างบัสที่ 19 และ 20 แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 ผลที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า สำหรับวิธี SGSPF จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่ามาก เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสเดิมในระบบ จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 1258 รอบ และ 1.6773 วินาที ตามลำดับ สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่มโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าขนาด $200 + j150$ kVA ระหว่างบัสที่ 19 และ 20 แสดงไว้ในตารางที่ 3.7 ผลที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ สำหรับวิธี SGSPF จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่ามาก เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสเดิมในระบบ จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 1272 รอบ และ 1.7554 วินาที ตามลำดับ สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่มโหลดแทบไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจาก 970 รอบ เป็น 971 รอบ เมื่อตำแหน่งเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสที่ 20 เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SGSPF

ตารางที่ 3.5 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
10%	1236	974	1.6448	1.1492	1.4313
20%	1109	974	1.3911	1.1614	1.1978
30%	1072	974	1.3872	1.1536	1.1997
40%	1058	975	1.3388	1.1815	1.1331
50%	1055	975	1.3189	1.1825	1.1153
60%	1061	975	1.3637	1.1713	1.1643
70%	1080	975	1.3892	1.1748	1.1825
80%	1126	975	1.4513	1.1747	1.2355
90%	1278	975	1.6813	1.1798	1.4251

ตารางที่ 3.6 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
10%	1218	962	1.5657	0.9112	1.7183
20%	1094	962	1.3848	0.9173	1.5096
30%	1057	962	1.3341	0.9204	1.4495
40%	1043	962	1.3230	0.9217	1.4354
50%	1040	962	1.3115	0.9131	1.4363
60%	1047	962	1.3322	0.9215	1.4457
70%	1065	962	1.3465	0.9141	1.4730
80%	1110	962	1.4448	0.9204	1.5698
90%	1258	962	1.6773	0.9122	1.8387

ตารางที่ 3.7 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
10%	1230	970	1.6369	0.9342	1.7522
20%	1104	970	1.4309	0.9364	1.5281
30%	1067	970	1.2893	0.9341	1.3803
40%	1053	970	1.1821	0.9366	1.2621
50%	1050	971	1.1151	0.9456	1.1793
60%	1057	971	1.2013	0.9490	1.2659
70%	1075	971	1.3221	0.9400	1.4065
80%	1121	971	1.4327	0.9456	1.5151
90%	1272	971	1.7554	0.9443	1.8589

ส่วนที่ 2 ผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย

สำหรับส่วนที่ 2 ทำการทดสอบโดยติดตั้งโหลดเพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดยติดตั้งโหลดที่กึ่งกลางของสายส่งระหว่างบัส 2 บัสซึ่งทำให้เกิดบัสเสริมขึ้น แล้วเพิ่มจำนวนโหลดเข้าในระบบเพื่อดูผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับการลู่เข้าของผลเฉลย

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

สำหรับชุดโหลดที่ใช้ศึกษาผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับการลู่เข้าของผลเฉลย ของระบบทดสอบ 15 บัส ประกอบด้วยโหลด 3 ชุด ถูกติดตั้งเข้าในระบบทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 15 บัส

ชุดโหลด	โหลดติดตั้งระหว่างบัส	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
1	3 – 4	$10 - j11$	$600 + j700$	$80 + j90$
2	9 – 10	$9 - j10$	$400 + j500$	$60 + j70$
3	11 – 12	$5 - j6$	$200 + j300$	$40 + j50$

ผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 15 บัส โดยใช้แบบจำลอง โหลดกระแสไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.9 เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดมากขึ้นวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบ และเวลาในการคำนวณมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 237 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0913 วินาที แต่เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบจำนวน 3 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 291 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 0.1349 วินาที สำหรับวิธี TGSPF จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 171 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0633 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดเป็น 3 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 175 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0659 วินาที ส่วนผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.10 เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดมากขึ้นวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 233 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0886 วินาที แต่เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบจำนวน 3 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 286 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 0.1302 วินาที สำหรับวิธี TGSPF จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 169 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0607 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดเป็น 3 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 172 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0639 วินาที และผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 3.11 เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดมากขึ้นวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 235 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0905 วินาที แต่เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบจำนวน 3 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 285 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 0.1287 วินาที สำหรับวิธี TGSPF จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 170 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0628 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดเป็น 3 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 172 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 0.0648 วินาที เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SGSPF

ตารางที่ 3.9 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
1	237	171	0.0913	0.0633	1.4423
1-2	256	173	0.1082	0.0654	1.6544
1-3	291	175	0.1349	0.0659	2.0470

ตารางที่ 3.10 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	
1	233	169	0.0886	0.0607	1.4596
1-2	250	170	0.1067	0.0628	1.6990
1-3	286	172	0.1302	0.0639	2.0376

ตารางที่ 3.11 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 15 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	
1	235	170	0.0905	0.0628	1.4411
1-2	251	171	0.1053	0.0638	1.6505
1-3	285	172	0.1287	0.0648	1.9861

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

สำหรับชุดโหลดที่ใช้ศึกษาผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับการรู้เข้าของผลเฉลย ของระบบทดสอบ 34 บัส ประกอบด้วยโหลด 5 ชุด ถูกติดตั้งไว้ในระบบทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 34 บัส

ชุดโหลด	โหลดติดตั้งระหว่างบัส	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
1	14 – 15	$11 - j9$	$900 + j700$	$70 + j50$
2	19 – 20	$18 - j15$	$1500 + j1200$	$200 + j150$
3	24 – 25	$15 - j13$	$1200 + j1000$	$150 + j100$
4	29 – 30	$11 - j9$	$900 + j700$	$70 + j50$
5	32 – 33	$8 - j7$	$500 + j400$	$50 + j40$

ผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 34 บัส โดยใช้แบบจำลอง โหลดกระแสไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.13 เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดมากขึ้นวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบ และเวลาในการคำนวณมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 974 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.2041 วินาที แต่เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบจำนวน 5 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1402 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 2.2894 วินาที สำหรับวิธี TGSPF เมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 963 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.1653 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดเป็น 5 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1006 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.2371 วินาที ส่วนผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลด อิมพีแดนซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.14 เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดมากขึ้นวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 972 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.1972 วินาที แต่เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบจำนวน 5 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1354 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 2.1723 วินาที สำหรับวิธี TGSPF เมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 961 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.1470 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดเป็น 5 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 973 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.1858 วินาที และผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลด กำลังไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 3.15 เมื่อจำนวนเพิ่มโหลดมากขึ้นวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 972 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.1944 วินาที แต่เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบจำนวน 5 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1375 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 2.1936 วินาที สำหรับวิธี TGSPF เมื่อเพิ่มโหลด 1 ชุด ใช้จำนวนรอบ 961 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.1600 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดเป็น 5 ชุด จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 988 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.2209 วินาที เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SGSPF

ตารางที่ 3.13 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา SGSPF/TGSPF
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	
1	974	963	1.2041	1.1653	1.0333
1-2	1068	977	1.3908	1.1856	1.1731
1-3	1232	992	1.7958	1.2164	1.4763
1-4	1301	999	1.9156	1.2169	1.5742
1-5	1402	1006	2.2894	1.2371	1.8506

ตารางที่ 3.14 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
1	972	961	1.1972	1.1470	1.0438
1-2	1052	963	1.3188	1.1539	1.1429
1-3	1196	965	1.6888	1.1677	1.4463
1-4	1258	968	1.8554	1.1804	1.5718
1-5	1354	973	2.1723	1.1858	1.8319

ตารางที่ 3.15 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	SGSPF/TGSPF
1	972	961	1.1944	1.1600	1.0297
1-2	1062	972	1.3781	1.1906	1.1575
1-3	1219	982	1.7760	1.2019	1.4777
1-4	1282	985	1.8975	1.2074	1.5701
1-5	1375	988	2.1936	1.2209	1.7967

3.5 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

หัวข้อนี้นำเสนอวิธีการคำนวณผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด หลักการนี้ใช้เทคนิคการกำจัดบัสเสริมที่เพิ่มเข้ามาในระบบโดยการถ่ายโอนไปอยู่ที่บัสข้างเคียงที่มีอยู่เดิม โหลดที่ถูกถ่ายโอนไปยังบัสข้างเคียงจะถูกเขียนในรูปของกำลังไฟฟ้า ซึ่งแนวทางในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามี 2 แนวทางด้วยกัน คือ กำลังงานไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนจะถูกนำไปรวมกับส่วนของ S_{cal} และแนวทางที่สอง คือ นำไปรวมกับส่วนของ S_{sch} ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแนวทางที่สองเพื่อวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากสมการกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการถ่ายโอนโหลดถ้านำไปรวมกับส่วนของ S_{cal} จะมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้การคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนมีความซับซ้อนตามไปด้วย แต่ปัญหาเหล่านี้จะหมดไป ถ้านำกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการถ่ายโอนโหลดไปรวมกับส่วนของ S_{sch} ดังนี้

จากสมการที่ (3-35)
$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)}$$

จัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้ $S_{sch,k}^{old} = P_{sch,k} + jQ_{sch,k}$ จะได้ว่า

$$\frac{(S_{sch,k}^{old})^*}{(V_k)^*} - I_l^{(k)} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i$$

$$(S_{sch,k}^{old})^* - (V_k)^* I_l^{(k)} = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (3-40)$$

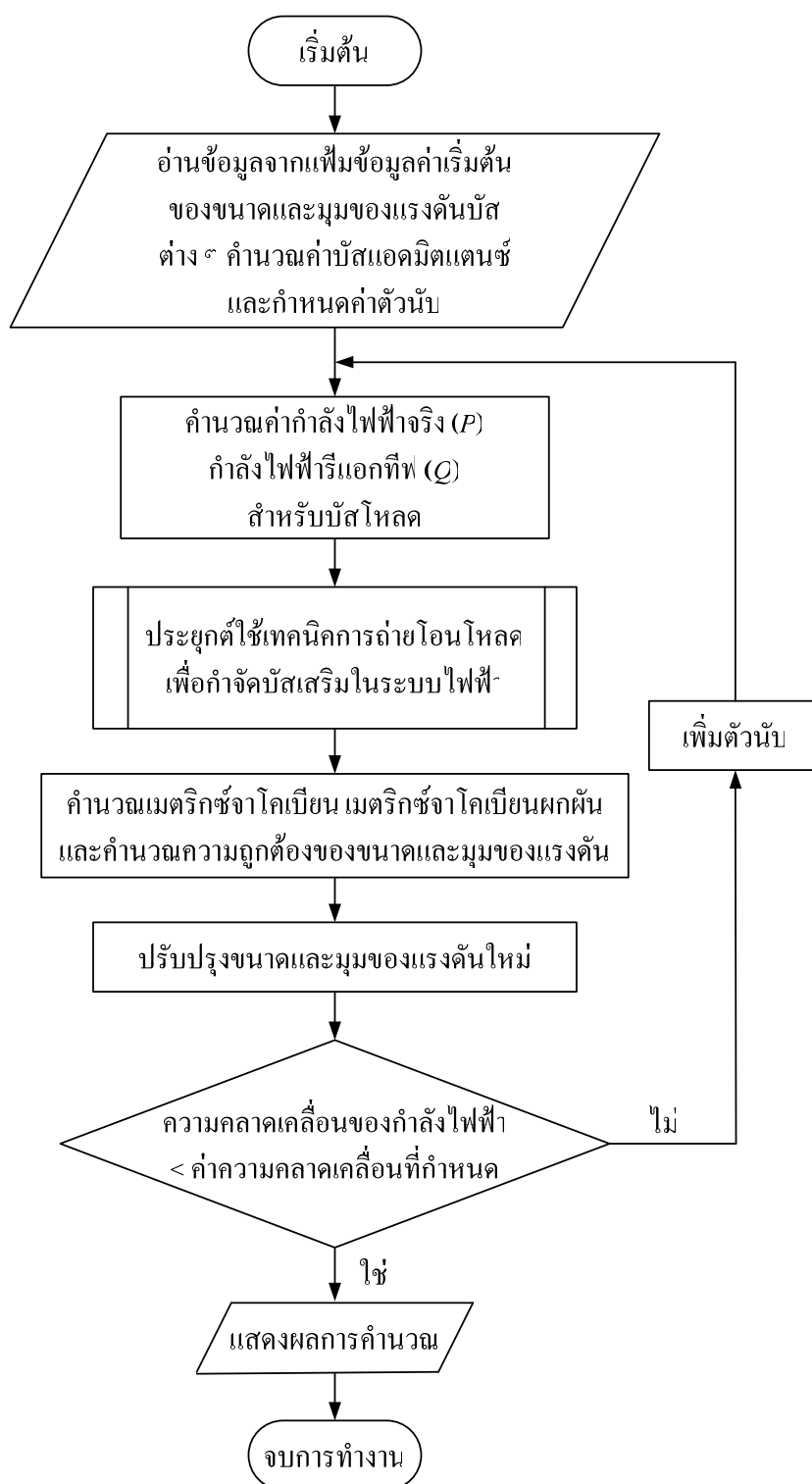
กำหนด $(S_{sch,k}^{new})^* = (S_{sch,k}^{old})^* - (V_k)^* I_l^{(k)}$ สำหรับบัส k

และ $(S_{sch,m}^{new})^* = (S_{sch,m}^{old})^* - (V_m)^* I_l^{(m)}$ สำหรับบัส m ดังนั้น จะได้

บัส k :
$$(S_{sch,k}^{new})^* = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (3-41)$$

บัส m :
$$(S_{sch,m}^{new})^* = (V_m)^* \sum_{i=1}^n Y_{m,i} V_i \quad (3-42)$$

สมการที่ (3-41) และ (3-42) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส k และ บัส m ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด การคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนจะเหมือนกับวิธีนิวตัน-ราฟสันรูปแบบปกติในบทที่ 2 ทุกประการ ทำให้ขนาดของเมตริกซ์จาโคเบียนไม่เปลี่ยนแปลง แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยนิวตัน-ราฟสัน
ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด

3.6 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของตำแหน่งติดตั้งโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย โดยทั้ง 2 ส่วนทดสอบกับระบบทดสอบ 69 บัส และ 85 บัส โดยระบบทดสอบทั้งสองเป็นระบบทดสอบสายป้อนแบบ 3 เฟสสมดุล ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. การทดสอบจะแสดงการเปรียบเทียบจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณระหว่างการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันมาตรฐาน (SNRPF) และการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด (TNRPF) โดยใช้แบบจำลองโหลด 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และกำลังไฟฟ้า การทดสอบได้กำหนดเงื่อนไขการหยุดไว้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 1×10^{-4} p.u. ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบทุกกรณี สำหรับจุดเริ่มต้นของการคำนวณได้ใช้จุดเริ่มต้นเดียวกันสำหรับการคำนวณทั้ง 2 วิธี โดยกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นมีค่า $1.00 + j0.00$ p.u. สำหรับทุกบัส ผลทดสอบเป็นดังนี้

ส่วนที่ 1 ผลของตำแหน่งติดตั้งกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย

สำหรับส่วนที่ 1 ทำการทดสอบโดยติดตั้งโหลดเพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดยติดตั้งโหลดที่สายส่งระหว่างบัส 2 บัสซึ่งทำให้เกิดบัสเสริมขึ้น แล้วแปรค่าตำแหน่งติดตั้งจากต้นสายส่ง (ที่ระยะ 10% ของความยาวสายส่ง) ไปจนถึงปลายของสายส่ง (ที่ระยะ 90% ของความยาวสายส่ง) เพื่อดูผลของตำแหน่งการติดตั้งโหลดกับการลู่เข้าของผลเฉลย ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทของโหลดแสดงไว้ในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ

ระบบทดสอบ	ติดตั้งระหว่าง บัสที่	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
69 บัส	49 – 50	$17 - j15$	$1200 + j1000$	$150 + j120$
85 บัส	58 – 60	$9 - j10$	$500 + j600$	$50 + j60$

1) ระบบทดสอบ 69 บัส

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 69 บัส เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกระแสไฟฟ้าขนาด $17 - j15$ A ระหว่างบัสที่ 49 และ 50 แสดงไว้ในตารางที่ 3.17 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบ

ในการคำนวณ 5 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.081 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากับวิธี SNRPF และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.077 วินาที สำหรับผลการทดสอบเมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ขนาด $1200 + j1000 \Omega$ ระหว่างบัสที่ 49 และ 50 แสดงไว้ในตารางที่ 3.18 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.081 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากับวิธี SNRPF และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.077 วินาที และผลการทดสอบเมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าขนาด $150 + j120 \text{ kVA}$ ระหว่างบัสที่ 49 และ 50 แสดงไว้ในตารางที่ 3.19 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.081 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ เท่ากับวิธี SNRPF และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.077 วินาที เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SNRPF

ตารางที่ 3.17 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	
10%	5	5	0.0806	0.0787	1.0241
20%	5	5	0.0823	0.0761	1.0815
30%	5	5	0.0818	0.0780	1.0487
40%	5	5	0.0807	0.0766	1.0535
50%	5	5	0.0816	0.0770	1.0597
60%	5	5	0.0806	0.0782	1.0307
70%	5	5	0.0808	0.0771	1.0480
80%	5	5	0.0820	0.0773	1.0608
90%	5	5	0.0805	0.0774	1.0401

ตารางที่ 3.18 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	SNRPF/TNRPF
10%	5	5	0.0811	0.787	1.0305
20%	5	5	0.0805	0.778	1.0347
30%	5	5	0.0818	0.0762	1.0735
40%	5	5	0.0824	0.0771	1.0687
50%	5	5	0.0825	0.0767	1.0756
60%	5	5	0.0814	0.0770	1.0571
70%	5	5	0.0821	0.0781	1.0512
80%	5	5	0.0822	0.0768	1.0703
90%	5	5	0.0818	0.0780	1.0487

ตารางที่ 3.19 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	SNRPF/TNRPF
10%	5	5	0.0806	0.0769	1.0481
20%	5	5	0.0806	0.0776	1.0387
30%	5	5	0.0809	0.0773	1.0466
40%	5	5	0.0813	0.0780	1.0423
50%	5	5	0.0820	0.0775	1.0581
60%	5	5	0.0820	0.0781	1.0499
70%	5	5	0.0805	0.0780	1.0321
80%	5	5	0.0816	0.0776	1.0515
90%	5	5	0.0811	0.0772	1.0505

2) ระบบทดสอบ 85 บัส

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 85 บัส เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกระแสไฟฟ้าขนาด $9 - j10$ A ระหว่างบัสที่ 58 และ 60 แสดงไว้ในตารางที่ 3.20 โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 6 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.164 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดอยู่ที่ประมาณกึ่งกลางของสายส่งและจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 6 รอบ เท่ากับวิธี SNRPF เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสต้นและบัสปลายของสายส่ง สำหรับผลการทดสอบเมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์ขนาด $500 + j600$ Ω ระหว่างบัสที่ 58 และ 60 แสดงไว้ในตารางที่ 3.21 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.129 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ เท่ากับวิธี SNRPF และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.124 วินาที สำหรับผลการทดสอบเมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าขนาด $50 + j60$ kVA ระหว่างบัสที่ 58 และ 60 แสดงไว้ในตารางที่ 3.22 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.130 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ เท่ากับวิธี SNRPF และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.125 วินาที

ตารางที่ 3.20 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	
10%	6	6	0.1622	0.1561	1.0391
20%	6	6	0.1637	0.1563	1.0473
30%	6	5	0.1644	0.1260	1.3048
40%	6	5	0.1635	0.1261	1.2966
50%	6	5	0.1622	0.1252	1.2966
60%	6	5	0.1646	0.1249	1.3179
70%	6	5	0.1634	0.1246	1.3114
80%	6	6	0.1639	0.1566	1.0466
90%	6	6	0.1633	0.1565	1.0435

ตารางที่ 3.21 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส

กรณีแบบจำลองโหนดอิมพีแดนซ์

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	SNRPF/TNRPF
10%	5	5	0.1289	0.1237	1.0420
20%	5	5	0.1306	0.1239	1.0541
30%	5	5	0.1288	0.1234	1.0438
40%	5	5	0.1270	0.1238	1.0258
50%	5	5	0.1271	0.1237	1.0275
60%	5	5	0.1289	0.1232	1.0463
70%	5	5	0.1299	0.1238	1.0493
80%	5	5	0.1286	0.1235	1.0413
90%	5	5	0.1288	0.1240	1.0387

ตารางที่ 3.22 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส

กรณีแบบจำลองโหนดกำลังไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	SNRPF/TNRPF
10%	5	5	0.1310	0.1246	1.0514
20%	5	5	0.1297	0.1240	1.0460
30%	5	5	0.1288	0.1249	1.0312
40%	5	5	0.1303	0.1247	1.0449
50%	5	5	0.1289	0.1249	1.0320
60%	5	5	0.1283	0.1242	1.0330
70%	5	5	0.1291	0.1248	1.0345
80%	5	5	0.1296	0.1238	1.0468
90%	5	5	0.1313	0.1246	1.0538

ส่วนที่ 2 ผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย

สำหรับส่วนที่ 2 ทำการทดสอบโดยติดตั้งโหลดเพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดยติดตั้งโหลดที่กึ่งกลางของสายส่งระหว่างบัส 2 บัส ซึ่งทำให้เกิดบัสเสริมขึ้น แล้วเพิ่มจำนวนโหลดเข้าในระบบเพื่อดูผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับการลู่เข้าของผลเฉลย

1) ระบบทดสอบ 69 บัส

สำหรับชุดโหลดที่ใช้ศึกษาผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับการลู่เข้าของผลเฉลย ของระบบทดสอบ 69 บัส ประกอบด้วยโหลด 5 ชุด ถูกติดตั้งเข้าในระบบทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.23

ตารางที่ 3.23 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 69 บัส

ชุดโหลด	โหลดติดตั้งระหว่างบัส	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
1	22 – 23	$7 - j6$	$700 + j600$	$50 + j40$
2	32 – 33	$7 - j6$	$700 + j600$	$50 + j40$
3	42 – 43	$13 - j11$	$1000 + j800$	$100 + j80$
4	49 – 50	$17 - j15$	$1200 + j1000$	$150 + j120$
5	59 – 60	$13 - j11$	$1000 + j800$	$100 + j80$

ผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 69 บัส โดยใช้แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.24 เมื่อเพิ่มโหลดจาก 1 ชุด จนถึง 4 ชุด วิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดเป็น 5 ชุด จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 6 รอบ และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นตามจำนวนชุดโหลดที่เพิ่มเข้าในระบบ เมื่อเพิ่มโหลดชุดที่ 1 เพียงชุดเดียววิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ 5 รอบ และ 0.0827 วินาที ตามลำดับ เมื่อจำนวนชุดโหลดเพิ่มเป็น 5 ชุด จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 6 รอบ และ 0.1175 วินาที ตามลำดับ สำหรับวิธี TNRPF การเพิ่มโหลดทั้ง 5 ชุดเข้าในระบบใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากัน และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.25 การเพิ่มโหลดทั้ง 5 ชุดไม่ทำให้จำนวนรอบในการคำนวณเพิ่มขึ้น โดยวิธี SNRPF และวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากัน ทั้งสองวิธีใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเมื่อเพิ่มโหลดจาก 1 ชุด เป็น 5 ชุด กรณีโหลด 1 ชุด วิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.0822 วินาที

และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.0767 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดในระบบเป็น 5 ชุด วิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.0946 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.0783 วินาที และผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.26 กรณีเพิ่มโหลดเข้าในระบบไฟฟ้า 1 ชุดวิธี SNRPF และวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากัน และเมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบเป็น 5 ชุด ทั้งสองวิธียังคงใช้จำนวนรอบในการคำนวณเท่ากัน คือ 5 รอบ สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนการเพิ่มโหลดเข้าในระบบ กรณีเพิ่มโหลด 1 ชุดวิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.0815 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.0782 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดในระบบเป็น 5 ชุดวิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.0949 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.0783 วินาที

ตารางที่ 3.24 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	
1	5	5	0.0827	0.0780	1.0603
1-2	5	5	0.0861	0.0781	1.1024
1-3	5	5	0.0882	0.0784	1.1250
1-4	5	5	0.0896	0.0784	1.1429
1-5	6	5	0.1175	0.0786	1.4949

ตารางที่ 3.25 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	
1	5	5	0.0822	0.0767	1.0717
1-2	5	5	0.0840	0.0771	1.0895
1-3	5	5	0.0855	0.0776	1.1018
1-4	5	5	0.0892	0.0781	1.1421
1-5	5	5	0.0946	0.0783	1.2082

ตารางที่ 3.26 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	SNRPF/TNRPF
1	5	5	0.0815	0.0782	1.0422
1-2	5	5	0.0850	0.0780	1.0897
1-3	5	5	0.0869	0.0782	1.1113
1-4	5	5	0.0898	0.0782	1.1483
1-5	5	5	0.0949	0.0783	1.2120

2) ระบบทดสอบ 85 บัส

สำหรับชุดโหลดที่ใช้ศึกษาผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับการรู้เข้าของผลเฉลย ของระบบทดสอบ 85 บัส ประกอบด้วยโหลด 5 ชุด ถูกติดตั้งเข้าในระบบทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.27

ตารางที่ 3.27 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 85 บัส

ชุดโหลด	โหลดติดตั้งระหว่างบัส	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
1	20 – 21	$9 - j10$	$500 + j600$	$50 + j60$
2	45 – 46	$11 - j13$	$800 + j1000$	$80 + j100$
3	58 – 60	$9 - j10$	$500 + j600$	$50 + j60$
4	69 – 70	$11 - j13$	$800 + j1000$	$80 + j100$
5	81 – 83	$9 - j10$	$500 + j600$	$50 + j60$

ผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 85 บัส โดยใช้แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.28 เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบ 1 ชุดวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ และเมื่อเพิ่มจำนวนโหลดเป็น 2 ชุด จนถึง 4 ชุด จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 6 รอบ และจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 7 รอบ เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดเป็น 5 ชุด สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบ 1 ชุด และจำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 6 รอบ เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดเป็น 2 ชุด จนถึง 5 ชุด สำหรับเวลา

เฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชุดโหลดที่เพิ่มเข้าในระบบ เมื่อเพิ่มโหลดชุดที่ 1 เพียงชุดเดียว วิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.1290 วินาที และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.2189 วินาที เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดเป็น 5 ชุด สำหรับวิธี TNRPF เมื่อเพิ่มโหลดชุดที่ 1 เข้าในระบบใช้เวลาในการคำนวณ 0.1249 วินาที และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.1568 วินาที เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดเป็น 5 ชุด ส่วนผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.29 เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบไฟฟ้า 1 ชุด จนถึง 3 ชุด วิธี SNRPF และวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากัน และจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มเป็น 6 รอบ เมื่อจำนวนการเพิ่มโหลดเป็น 4 ชุด จนถึง 5 ชุด ทั้งสองวิธีใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเมื่อเพิ่มโหลดจาก 1 ชุด เป็น 5 ชุด กรณีโหลด 1 ชุดวิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.1296 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.1244 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดในระบบเป็น 5 ชุด วิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.1790 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.1566 วินาที และผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.30 กรณีเพิ่มโหลดเข้าในระบบไฟฟ้า 1 ชุด วิธี SNRPF และวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากัน และเมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบเป็น 5 ชุด ทั้งสองวิธียังคงใช้จำนวนรอบในการคำนวณเท่ากัน คือ 5 รอบ สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนการเพิ่มโหลดเข้าในระบบ กรณีเพิ่มโหลด 1 ชุด วิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.1290 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.1237 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดในระบบเป็น 5 ชุด วิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.1418 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.1240 วินาที เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SNRPF

ตารางที่ 3.28 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	
1	5	5	0.1290	0.1249	1.0328
1-2	6	6	0.1690	0.1560	1.0833
1-3	6	6	0.1720	0.1566	1.0983
1-4	6	6	0.1750	0.1565	1.1182
1-5	7	6	0.2189	0.1568	1.3960

ตารางที่ 3.29 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	SNRPF/TNRPF
1	5	5	0.1296	0.1244	1.0418
1-2	5	5	0.1325	0.1247	1.0626
1-3	5	5	0.1358	0.1248	1.0881
1-4	6	6	0.1736	0.1564	1.1100
1-5	6	6	0.1790	0.1566	1.1430

ตารางที่ 3.30 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 85 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

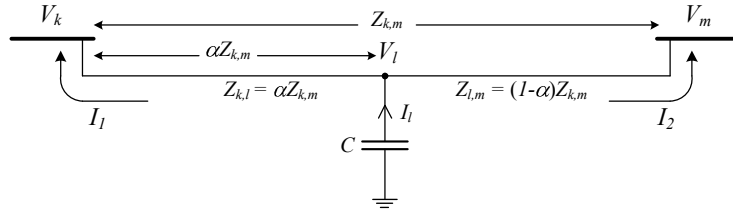
จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	SNRPF/TNRPF
1	5	5	0.1290	0.1237	1.0428
1-2	5	5	0.1317	0.1238	1.0638
1-3	5	5	0.1349	0.1239	1.0888
1-4	5	5	0.1370	0.1239	1.1057
1-5	5	5	0.1418	0.1240	1.1435

3.7 เทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชย (compensators transfer technique)

การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในบางกรณีเป็นการเพิ่มบัสใหม่ในระบบ ทำให้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้ง จากเทคนิคการถ่ายโอนโหลดที่ได้แสดงไปในหัวข้อที่ 3.2 นำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชยในสถานะคงตัวเพื่อวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองอุปกรณ์ชดเชย 3 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM มีหลักการดังนี้

3.7.1 อุปกรณ์ชดเชยตัวเก็บประจุ

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.10 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส / อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ ต้องการกำจัดบัสเสริม / ออกไปเพื่อให้ขนาดของระบบไม่เปลี่ยนแปลง มีหลักการดังนี้



รูปที่ 3.10 บัส l ที่มีตัวเก็บประจูดต่อเชื่อมอยู่

จากรูปที่ 3.1 วิเคราะห์โดยใช้ KVL และ KCL จะได้ว่า

$$\text{Loop } I_1: V_l - V_k = Z_{k,l} I_1 \quad (3-43)$$

$$\text{Loop } I_2: V_l - V_m = Z_{l,m} I_2 \quad (3-44)$$

นำสมการที่ (3-43) ลบกับสมการที่ (3-44) จะได้

$$V_m - V_k = Z_{k,l} I_1 - Z_{l,m} I_2 \quad (3-45)$$

โดยที่ $I_1 = I_l - I_2$ และ $I_2 = I_l - I_1$

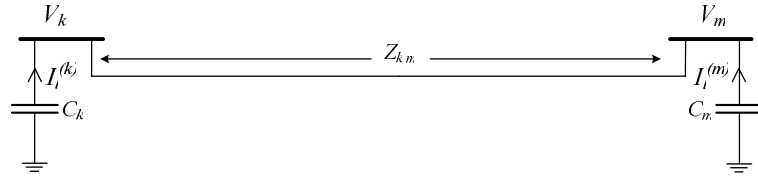
กำจัด I_2 โดยการแทนค่า $I_2 = I_l - I_1$ ในสมการที่ (3-45) และจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$I_1 = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l + \left(\frac{V_m - V_k}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \quad (3-46)$$

กำจัด I_1 โดยการแทนค่า $I_1 = I_l - I_2$ ในสมการที่ (3-45) และจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$I_2 = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l - \left(\frac{V_m - V_k}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \quad (3-47)$$

แบบจำลองการย้ายตัวเก็บประจุที่บัสเสริม l ใด ๆ ในรูปที่ 3.10 ไปยังบัสข้างเคียง สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบจำลองการย้ายตัวเก็บประจุจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m

จากรูปที่ 3.11 โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนด จะได้ว่า

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \quad (3-48)$$

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \quad (3-49)$$

การหาแรงดันที่บัส l หาได้ดังนี้

จากสมการที่ (3-43) จะได้ว่า

$$I_1 = \frac{V_l - V_k}{Z_{k,l}} \quad (3-50)$$

แทนค่า $I_2 = I_l - I_1$ ลงในสมการที่ (3-44) และจัดรูปสมการ จะได้

$$I_1 = \frac{V_m - V_l}{Z_{l,m}} + I_l \quad (3-51)$$

แทนค่า I_1 จากสมการที่ (3-51) ลงในสมการที่ (3-50) จะได้

$$\frac{V_m}{Z_{l,m}} - \frac{V_l}{Z_{l,m}} + I_l = \frac{V_l}{Z_{k,l}} - \frac{V_k}{Z_{k,l}}$$

$$\left(\frac{Z_{k,l} + Z_{l,m}}{Z_{k,l} Z_{l,m}} \right) V_l = \frac{V_k}{Z_{k,l}} + \frac{V_m}{Z_{l,m}} + I_l$$

$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m + \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \quad (3-52)$$

เนื่องจากตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังนิยามกำหนดด้วยกำลังไฟฟ้ามากกว่า กระแสไฟฟ้างั้นเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขนี้ กระแสไฟฟ้า I_l สามารถเขียนแทนได้ด้วย $(S_l / V_l)^*$ จากสมการที่ (3-48), (3-49) และ (3-52) เขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการนำไปใช้ได้ตาม สมการที่ (3-53)-(3-55) ตามลำดับ

$$I_l^{(k)} = (1 - \alpha) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-53)$$

$$I_l^{(m)} = \alpha \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-54)$$

$$V_l = V_k - \alpha \left\{ V_k - V_m - (1 - \alpha) Z_{k,m} \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \right\} \quad (3-55)$$

3.7.2 อุปกรณ์ชดเชย SVC

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.12 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส l อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการติดตั้ง SVC ในระบบ สามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลซัดเชปแดนซ์ดังรูปที่ 3.13 ต้องการกำจัดบัสเสริม l ออกไปเพื่อให้ขนาดของระบบไม่เปลี่ยนแปลง มีหลักการดังนี้

$$I_l^{(m)} = \frac{\alpha j B_{SVC}}{\beta_1} (V_k - \alpha (V_k - V_m)) \quad (3-57)$$

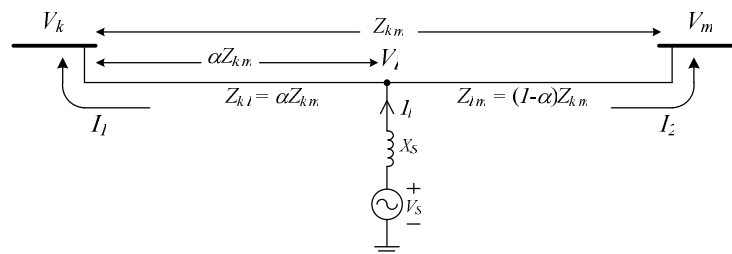
$$V_l = \frac{1}{\beta_1} (V_k - \alpha (V_k - V_m)) \quad (3-58)$$

โดยที่ B_{SVC} คือ ค่าชัศเชปแดนซ์ของ SVC

$$\beta_1 = 1 - (\alpha - \alpha^2) Z_{k,m} j B_{SVC}$$

3.7.3 อุปกรณ์ชดเชย D-STATCOM

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.15 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส / อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการติดตั้ง D-STATCOM ในระบบเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับรีแอคแตนซ์ ใช้วิธีการแปลงวงจรสมมูลเทวินินเป็นวงจรสมมูลนอร์ตันได้ดังรูปที่ 3.16 การกำจัดบัสเสริม / ออกไปเพื่อให้ขนาดของระบบไม่เปลี่ยนแปลงมีหลักการดังนี้



รูปที่ 3.15 บัส / ที่มี D-STATCOM ต่อเชื่อมอยู่

จากรูปที่ 3.16 แบบจำลองของ D-STATCOM ในสถานะคงตัวเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลนอร์ตันซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับค่ารีแอคแตนซ์และต่อขนานกับบัส / กระแส I_s คำนวณได้จากสมการที่ (3-59) นำเทคนิคการถ่ายโอนโหนดที่ได้แสดงวิธีการวิเคราะห์ไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2 มาประยุกต์ใช้โดยทำการวิเคราะห์ 2 ส่วน คือ ประยุกต์ใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนดกระแสไฟฟ้าในหัวข้อที่ 3.2.1 เพื่อถ่ายโอนค่ากระแสไฟฟ้าที่ฉีดโดย D-STATCOM และประยุกต์ใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนดอิมพีแดนซ์ในหัวข้อที่ 3.2.2 เพื่อถ่ายโอนค่ารีแอคแตนซ์ขนาน

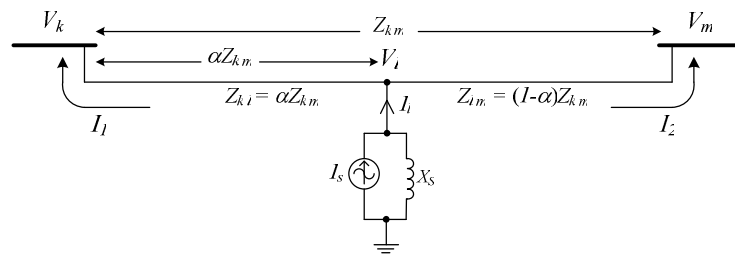
ค่าที่ได้จากการถ่ายโอนไปยังบัสข้างเคียงเขียนในรูปสมการกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-60) และ (3-61) แรงดันไฟฟ้าที่บัส l คำนวณได้จากสมการที่ (3-62)

$$I_s = \frac{V_s}{jX_s} \quad (3.59)$$

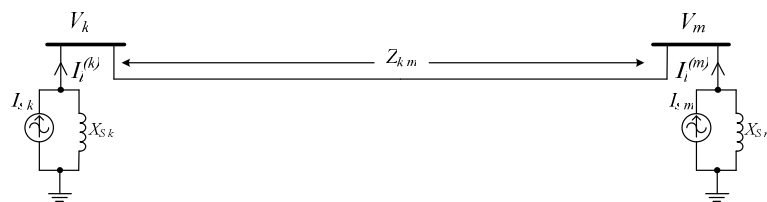
โดยที่ V_s คือ แรงดันของ D-STATCOM

X_s คือ รีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM

I_s คือ กระแสที่ฉีดโดย D-STATCOM



รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลนอร์ตันของ D-STATCOM



รูปที่ 3.17 แบบจำลองการย้าย D-STATCOM จากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m

$$I_l^{(k)} = (1 - \alpha)(I_s - \beta_2) \quad (3-60)$$

$$I_l^{(m)} = \alpha(I_s - \beta_2) \quad (3-61)$$

$$V_l = jX_s \beta_2 \quad (3-62)$$

โดยที่ X_s คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของ D-STATCOM

$$\beta_2 = \frac{V_k - \alpha(V_k - V_m - (1 - \alpha)Z_{k,m}I_s)}{jX_s + (\alpha - \alpha^2)Z_{k,m}}$$

3.8 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคการถ่ายโอนโหลด 3 ประเภทที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และกำลังไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีเกาส์-ไซเดลและวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยที่การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดได้นำเสนอการรวมกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการถ่ายโอนโหลดเข้ากับ S_{sch} เพื่อให้การคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนไม่เปลี่ยนแปลงและทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอโดยใช้ระบบทดสอบ 4 ระบบ โดยการแปรค่าตำแหน่งติดตั้งจากต้นของสายส่งไปจนถึงปลายของสายส่ง ด้วยเทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลงและตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบ ลำดับต่อมาศึกษาผลของการเพิ่มโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบ ด้วยเทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง เนื่องจากเทคนิคการถ่ายโอนโหลดจะทำให้ขนาดของระบบไฟฟ้ากำลังไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจะสามารถทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เทคนิคนี้ยังช่วยให้การจำลองผลมีความสะดวกขึ้นอย่างมากโดยไม่จำกัดตำแหน่งในการจำลองผลในระบบไฟฟ้าอีกต่อไป ลำดับต่อมาได้นำเสนอเทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชยในสถานะคงตัว 3 ชนิด เพื่อวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า ได้แก่ ตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM เพื่อให้เห็นข้อดีของเทคนิคการถ่ายโอนโหลดชัดเจนมากยิ่งขึ้นจึงได้นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 และบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 4

ตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

4.1 บทนำ

ปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าประสบปัญหาหลายประการ เช่น แรงดันไฟฟ้าตก คุณภาพของระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณภาพต่ำลง กำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น และประสิทธิภาพในการจ่ายไฟลดลง วิธีการแก้ไขปัญหาคือการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้ากับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อชดเชยกระแสไฟฟ้าจินตภาพให้กับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยยึดหลักของประสิทธิภาพโดยรวมและความประหยัด ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถติดตั้งตัวเก็บประจุที่ตำแหน่งใดก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการติดตั้ง การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุในปัจจุบันจำกัดอยู่ที่บัสเท่านั้น

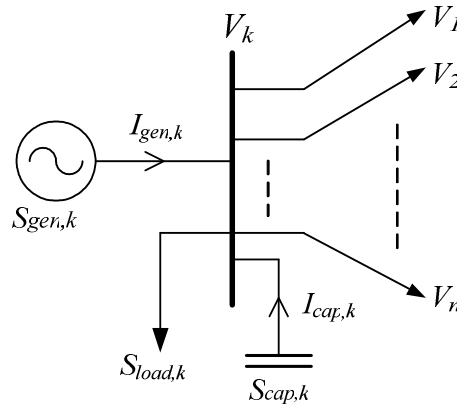
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดเพื่อกำจัดข้อจำกัดของตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุทำให้ตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นไปได้ทุกตำแหน่งในระบบไฟฟ้า ไม่จำกัดอยู่ที่บัสเท่านั้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังงานสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่หาได้จากการใช้ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (*LSF*) และดัชนีกำลังงานสูญเสีย (*PLI*) ลำดับต่อมาเป็นการค้นหาขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้จินเนติกอัลกอริทึม (*GA*) โดยวัตถุประสงค์หลักคือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ดังนี้

4.2 แบบจำลองตัวเก็บประจุ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายประเภท เช่น ตัวเก็บประจุ SVC รีแอคเตอร์ หรือ D-STATCOM ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าตัวเก็บประจุถือว่าได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีการลงทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นและง่ายต่อการบำรุงรักษา แต่ปัญหาที่สำคัญคือขนาดและตำแหน่งของตัวเก็บประจุที่จะนำไปติดตั้ง การติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงระดับแรงดันในระบบให้สูงขึ้นทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบลดลง แบบจำลองตัวเก็บประจุที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์มี 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power model) และแบบจำลองซัสเซปแทนซ์ (susceptance model) มีรายละเอียด ดังนี้

4.2.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ตัวเก็บประจุที่ถูกติดตั้งสามารถนำมาคำนวณโดยการดัดแปลงสมการกำลังไฟฟ้าไม่สอดคล้องในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส (scheduled power) พิจารณาจากรูปที่ 4.1 ดังนี้



รูปที่ 4.1 ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส k ใด ๆ

$$S_{sch,k} = S_{gen,k} + S_{cap,k} - S_{load,k} \quad (4-1)$$

โดยที่ $S_{sch,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส k

$S_{gen,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัส k

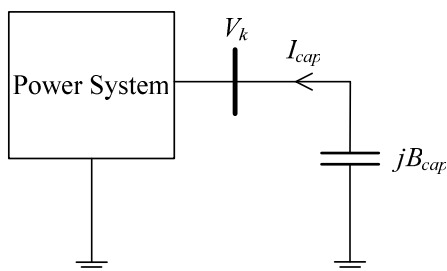
$S_{cap,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุที่บัส k

$S_{load,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k

4.2.2 แบบจำลองชั้สเชปแดนซ์

ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าชั้สเชปแดนซ์ของ B_{cap} ส่งผลให้เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ต้องถูกดัดแปลงในตำแหน่งตามแนวทแยงมุมของบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ พิจารณาจากรูปที่ 4.2 ตัวเก็บประจุถูกติดตั้งที่บัส k ใด ๆ เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ที่บัส k จะถูกปรับปรุง ดังนี้

$$[\mathbf{Y}_{bus}]_{k,k}^{(new)} = [\mathbf{Y}_{bus}]_{k,k}^{(old)} + j[\mathbf{B}_{cap}] \quad (4-2)$$



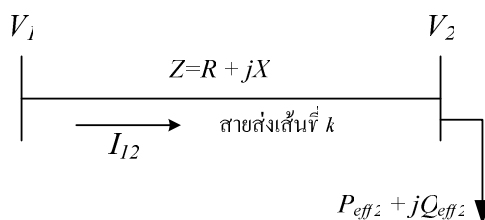
รูปที่ 4.2 ตัวชดเชยค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่บัส k ใด ๆ

4.3 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีความไวต่อกำลังงานสูญเสีย

โดยทั่วไปการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเลือกติดตั้งเพียงบางบัสเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดในด้านงบประมาณและความคุ้มค่าในการติดตั้ง งานวิจัยนี้จะนำเสนอดัชนีที่ใช้ระบุตำแหน่งบัสที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว คือ LSF และ PLI เพื่อช่วยให้ตำแหน่งที่เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุส่งผลดีที่สุดต่อระบบทั้งในเรื่องของระดับแรงดันและกำลังงานสูญเสีย ดังนี้

4.3.1 ตัวประกอบความไวการสูญเสีย LSF

ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (Loss Sensitivity Factors: LSF) สามารถคำนวณได้จากกำลังงานสูญเสียในสายส่งระหว่างบัส 2 บัสดังรูปที่ 4.3 (Prakash, and Sydulu, 2007)



รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส

จากรูปที่ 4.3 กำหนดให้

V_1, V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2

$P_{eff,2}$ คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส 2

$Q_{eff,2}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส 2

I_{12} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ k

Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้นที่ k

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเส้นที่ k คำนวณได้จากสมการที่ (4-3)

$$S_{lineloss} = (I_{12})^2 Z \quad (4-3)$$

จากสมการที่ (4.3) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ k คำนวณได้จากสมการที่ (4-4)

$$I_{12} = \frac{P_{eff,2} - jQ_{eff,2}}{(V_2)^*} \quad (4-4)$$

แทนค่ากระแส I_{12} จากสมการที่ (4-4) ลงในสมการที่ (4-3) จะได้

$$S_{lineloss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} Z \quad (4-5)$$

จากสมการที่ (4-5) กำลังงานสูญเสียในสายส่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ กำลังงานสูญเสียแอกทีฟ ($P_{lineloss}$) และกำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ ($Q_{lineloss}$) ดังนี้

$$P_{lineloss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} R \quad (4-6)$$

$$Q_{lineloss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} X \quad (4-7)$$

จากสมการที่ (4-6) และ (4-7) เขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ (4-8) และ (4-9)

$$P_{lineloss}[k] = \frac{(P_{eff}[m])^2 + (Q_{eff}[m])^2}{(|V[m]|)^2} R[k] \quad (4-8)$$

$$Q_{lineloss}[k] = \frac{(P_{eff}[m])^2 + (Q_{eff}[m])^2}{(|V[m]|)^2} X[k] \quad (4-9)$$

โดยที่ $P_{eff}[m]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส m
 $Q_{eff}[m]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส m
 $V[m]$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส m
 $R[k]$ คือ ความต้านทานส่วนจริงของสายส่งเส้นที่ k
 $X[k]$ คือ ความต้านทานส่วนจินตภาพของสายส่งเส้นที่ k

ตัวประกอบความไวการสูญเสียเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานสูญเสียในสายส่งเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัสนั้น คำนวณได้จากสมการที่ (4-10) และ (4-11)

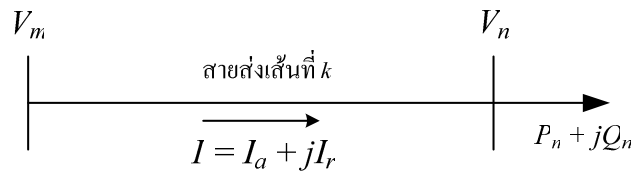
$$\frac{\partial P_{lineloss}[k]}{\partial Q_{eff}[m]} = \frac{2 \times R[k] \times Q_{eff}[m]}{(|V[m]|)^2} \quad (4-10)$$

$$\frac{\partial Q_{lineloss}[k]}{\partial Q_{eff}[m]} = \frac{2 \times X[k] \times Q_{eff}[m]}{(|V[m]|)^2} \quad (4-11)$$

บัสที่มีค่า LSF สูงสุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญเป็นลำดับแรก และบัสที่มีค่า LSF ต่ำที่สุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญไว้ท้ายสุด

4.3.2 ดัชนีกำลังงานสูญเสีย PLI

ดัชนีกำลังงานสูญเสีย (Power Loss Index: PLI) ถูกพัฒนาโดย (Reddy, and Sydulu, 2007) โดยการหาขนาดของตัวเก็บประจุค่าหนึ่งมาติดตั้งแต่ละบัส ซึ่งแต่ละบัสขนาดของตัวเก็บประจุอาจมีค่าเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ขึ้นกับดัชนีที่บัสนั้น ๆ ผลจากการติดตั้งตัวเก็บประจุทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังลดลง บัสใดที่กำลังงานสูญเสียลดลงมากที่สุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญก่อน ดังนี้



รูปที่ 4.4 แผนภาพระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเส้นเดียว

ดัชนีที่บัส n สามารถหาได้จาก

$$\text{Index}[n] = \frac{1}{(V[n])^2} + \frac{I_r[k]}{I_a[k]} + \frac{T_{Q \text{ load}}[n]}{\text{Total } Q} \quad (4-12)$$

โดยที่ $\text{Index}[n]$ คือ ดัชนีของบัส n

$V[n]$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส n

$I_r[k]$ คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจินตภาพในสายส่งเส้นที่ k

$I_a[k]$ คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจริงในสายส่งเส้นที่ k

$T_{Q \text{ load}}[n]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส n

$\text{Total } Q$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดในระบบไฟฟ้า

ขนาดของตัวเก็บประจุที่บัส n คำนวณได้จาก

$$\text{Capacitor}[n] = \text{Index}[n] \times Q_{\text{load}}[n] \quad (4-13)$$

โดยที่ $Q_{\text{load}}[n]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดที่บัส n

สำหรับดัชนี PLI หาได้จากการนำค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้จากสมการที่ (4-13) ไปติดตั้งที่บัสแล้วคำนวณกำลังงานสูญเสียหลังจากการติดตั้งตัวเก็บประจุและคำนวณกำลังงานสูญเสียที่ลดลง ทำเช่นนี้จนครบทุกบัส จากนั้นทำให้กำลังงานสูญเสียที่ลดลงมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงมากที่สุดมีค่าเป็น 1 และกำลังงานสูญเสียที่ลดลงน้อยที่สุดมีค่าเป็น 0 ค่าที่ได้เรียกว่า ดัชนีกำลังงานสูญเสีย (PLI) บัสที่มีค่า PLI สูงสุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญเป็นลำดับแรก และบัสที่มีค่า PLI ต่ำที่สุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญไว้ท้ายสุด

4.4 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

การค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสม ทำได้โดยการพิจารณาจากค่าดัชนีในหัวข้อที่ได้นำเสนอไปแล้วก่อนหน้านี้ ส่วนการหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ ทำได้โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ดังนี้

4.4.1 การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ

ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสม สามารถพิจารณาได้จากดัชนี LSF และ PLI ดังนี้ สำหรับดัชนี LSF บัสที่มีค่า LSF สูงที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกและบัสที่มีค่า LSF น้อยที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับสุดท้าย นอกจากนี้จะต้องพิจารณาขนาดของแรงดันที่บัสนั้นควบคุมกันไปด้วยโดยการหาค่านอร์มของ $V[i]$ สามารถหาได้จาก $V[i]/0.95$ ถ้าบัสใดมีค่ามากกว่า 1.01 p.u. บัสนั้นจะไม่ได้รับการเลือกให้เป็นตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ถึงแม้ว่าดัชนี LSF จะมีค่ามากที่สุดก็ตาม และบัสที่มีค่าดัชนี LSF รองลงมาจะได้รับการพิจารณา ดังนั้นบัสที่ถูกเลือกเป็นตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุจะต้องมีค่า LSF สูงและมีค่านอร์มของ $V[i]$ น้อยกว่า 1.01 สำหรับดัชนี PLI บัสที่มีค่า PLI สูงที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกและบัสที่มีค่า PLI น้อยที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับสุดท้าย

4.4.2 การหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ

ขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุหาได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตขนาดของตัวเก็บประจุ โดยกำหนดเงื่อนไขขนาดของตัวเก็บประจุแต่ละตำแหน่งติดตั้งไว้ที่ค่าต่ำสุดและสูงสุด คือ $Q_{c,i}^{min} = 200$ kVar และ $Q_{c,i}^{max} = 1200$ kVar ตามลำดับสามารถเขียนเป็นสมการปัญหาที่เหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (4-14)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && P_{loss} = I^2 R \\ &\text{subject to} && Q_{c,i}^{min} \leq Q_{c,i} \leq Q_{c,i}^{max} \quad \text{kVar} \end{aligned} \quad (4-14)$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบ

4.4.3 จินเนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GA) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยมีพื้นฐานมาจากกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (natural selection) และกระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ (natural genetic selection) ซึ่งคิดค้นโดย John Holland เมื่อปี ค.ศ. 1975 โดยการสร้างกลุ่มประชากรโครโมโซมแทนผลเฉลย จากนั้น ประชากรในกลุ่มจะแข่งขันกันเพื่อความอยู่รอด โดยโครโมโซมที่ดีกว่าจะมีโอกาสอยู่รอดได้มากกว่าและจะได้รับการถ่ายทอดพันธุกรรมไปยังรุ่นลูกหลานได้มากกว่าเช่นกัน สำหรับการสร้างลูกหลานจะใช้การดำเนินการทางสายพันธุ์ (genetic operation) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ๆ ดังนี้

1) การรีโพรดัคชัน (reproduction)

เนื่องจากโครโมโซมแต่ละชุดมีโอกาสในการอยู่รอดได้ไม่เท่ากัน ดังนั้น กระบวนการรีโพรดัคชันจึงเป็นกระบวนการคัดเลือกโครโมโซมจากกลุ่มประชากรที่มีความเหมาะสมสูงเพื่อนำมาเป็นชุดคำตอบเริ่มต้นให้กับกลุ่มประชากรรุ่นต่อไปโดยอาศัยทฤษฎีการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่เรียกว่า ค่าความฟิต (fitness value) ซึ่งโดยทั่วไปประเมินได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือปริมาณอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2) การครอสโอเวอร์ (crossover)

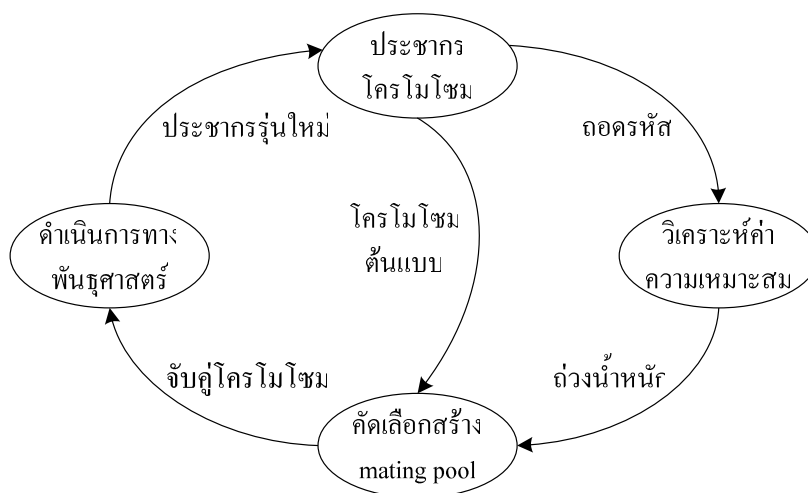
เป็นขั้นตอนที่ทำภายหลังการรีโพรดัคชัน โดยการแลกเปลี่ยนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (parent) ตามอัตราความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (probability of crossover) เพื่อสร้างชุดโครโมโซมรุ่นใหม่หรือโครโมโซมรุ่นลูก (offspring) อัตราการครอสโอเวอร์ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการหาคำตอบของจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งก็คืออัตราส่วนของจำนวนโครโมโซมลูกที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละรุ่นต่อขนาดของประชากร (population size) โดยปกติ จินเนติกอัลกอริทึมจะใช้การครอสโอเวอร์ในสัดส่วนที่สูง ประมาณ 60-70 % ของจำนวนประชากรทั้งหมด

3) การผ่าเหล่า (mutation)

เป็นขั้นตอนที่อาจช่วยให้โครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดีขึ้นหลังจากการครอสโอเวอร์ โดยการปรับเปลี่ยนข้อมูลบางส่วนของโครโมโซมเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ ตามอัตราส่วนความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (probability of mutation) ที่กำหนด อัตราการมิวเตชันหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนยีนทั้งหมดในประชากรที่จะเกิดการมิวเตชันขึ้น โดยปกติแล้ว จินเนติกอัลกอริทึมจะยอมให้การผ่าเหล่าเกิดขึ้นได้น้อยมากเพียง 1-2 % เท่านั้น

จินเนติกอัลกอริทึมได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ มากมาย เช่น ปัญหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด การทำนายคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้า รวมไปถึงการหาตัวแปรที่เหมาะสมของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการค้นหาคำตอบโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาคำหนดิตตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบ

ไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการค้นหาคำตอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและให้ค่า global optimum เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาด้วยวิธีอื่น ๆ (Zhang, and Tolbert, 2005) ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 วัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึม

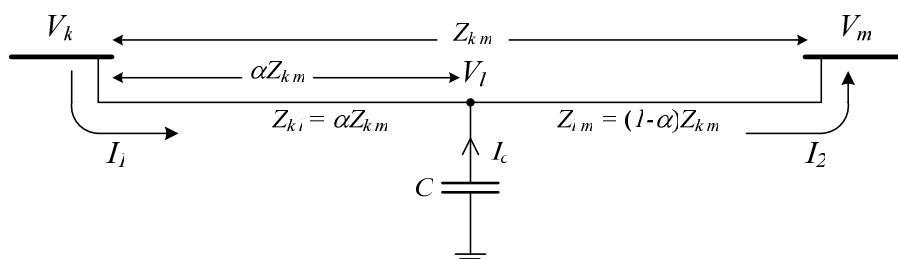
ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของวิธีการค้นหาคำตอบ

Method	Characteristics			
	Local Convergence	Global Convergence	Local Optimum	Global Optimum
GRG		✓	✓	
Newton	✓		✓	
SQP		✓	✓	
LP		✓	✓	
MIP		✓	✓	
DWDM		✓	✓	
LRDM		✓	✓	
GBD	✓		✓	
HM	✓		✓	
SA		✓		✓
GA		✓		✓
ANN		✓		✓

4.4.4 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับ

เทคนิคการถ่ายโอนโหลด

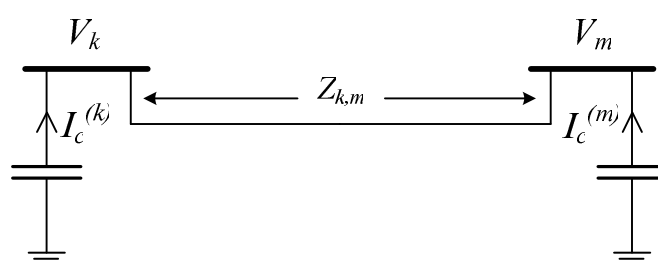
ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปมี 2 ส่วนที่ต้องพิจารณา คือ ตำแหน่งการติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ โดยปัญหาทั้ง 2 ส่วนมักถูกแยกวิเคราะห์ทีละส่วน เพื่อลดตัวแปรที่ต้องค้นหาและประหยัดหน่วยความจำที่ต้องใช้ในช่วงการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด การเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้หลาย ๆ ด้านในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าตัวเก็บประจุสามารถติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ ก็ได้ เช่น ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสโหลด ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งมีแรงดันต่ำ ๆ ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งมีระยะทางห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้ามาก ๆ หรือแม้แต่ติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่งระหว่างบัสใด ๆ ก็ได้ หรืออาจหาตำแหน่งติดตั้งโดยวิเคราะห์จากดัชนีต่าง ๆ เช่น *LSF* หรือ *PLI* เมื่อได้ตำแหน่งในการติดตั้งแล้ว ปัญหาเรื่องขนาดของตัวเก็บประจุที่จะติดตั้งจะเป็นส่วนที่ 2 ที่ต้องหาคำตอบ การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่าง ๆ เช่น ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kvar) ระดับของแรงดัน ชนิดของโหลด ธรรมชาติของโหลด ระดับฮาร์มอนิก ภูมิอากาศ ความปลอดภัยของระบบ และราคาของตัวเก็บประจุ (ทศพล รัตนนิยัมชัย, 2549)



รูปที่ 4.6 บัสเสริม l ที่มีตัวเก็บประจุต่อเชื่อมอยู่

ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก ดังนั้นปัญหาเรื่องตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุจึงสามารถแก้ปัญหาไปพร้อมกันได้ โดยไม่ต้องคำนึงถึงการประหยัดหน่วยความจำที่ใช้ระหว่างการค้นหาคำตอบ แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งติดตั้งจะจำกัดอยู่ที่บัสเดิมที่มีอยู่ในระบบเท่านั้น แต่ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าตัวเก็บประจุสามารถติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ ในระบบก็ได้ พิจารณารูปที่ 4.6 บัส k และ m เป็นบัสเดิมในระบบไฟฟ้า บัส l เป็นบัสเสริมที่เกิดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุ การวิเคราะห์ระบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน บัส l จะต้องกำหนดเพิ่มเข้ามาส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อตำแหน่งการติดตั้งเปลี่ยนไปเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ของระบบจะเปลี่ยนไปด้วย ทำให้การโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองผลมีความซับซ้อนมาก

ปัญหาเรื่องบัลลิสต์ที่มาจากอุปกรณ์ชดเชยจะหมดไปเมื่อนำเทคนิคการถ่ายโอนโหนดเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า เทคนิคดังกล่าวจะทำการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชยไปยังบัลลิสต์ข้างเคียงที่มีอยู่เดิม ดังในรูปที่ 4.7 ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยสามารถแปรเปลี่ยนได้ตลอดเวลาในระหว่างการจำลองผลโดยที่ขนาดของระบบและเมตริกซ์บัลลิสต์แอดมิตแตนซ์ของระบบจะไม่เปลี่ยนแปลงทำให้การโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองผลทำได้สะดวกมากขึ้น ดังนั้นในระหว่างการจำลองผล เพื่อแก้ปัญหาเรื่องตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงสามารถทำได้พร้อม ๆ กัน



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการถ่ายโอนตัวเก็บประจุ

4.5 ผลการทดสอบ

การทดสอบในบทนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการค้นหาคำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *LSF* ส่วนที่ 2 เป็นการค้นหาคำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *PLI* โดยตำแหน่งที่ได้จากดัชนีทั้ง 2 ตัวไม่จำเป็นต้องเป็นตำแหน่งเดียวกัน และส่วนที่ 3 เป็นการค้นหาคำหนดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งที่เลือกจากดัชนีทั้ง 2 ตัวเปรียบเทียบกับคำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนดภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยทั้ง 3 ส่วนทดสอบกับระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส และ 85 บัส ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะสมดุล ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ผลเป็นดังนี้

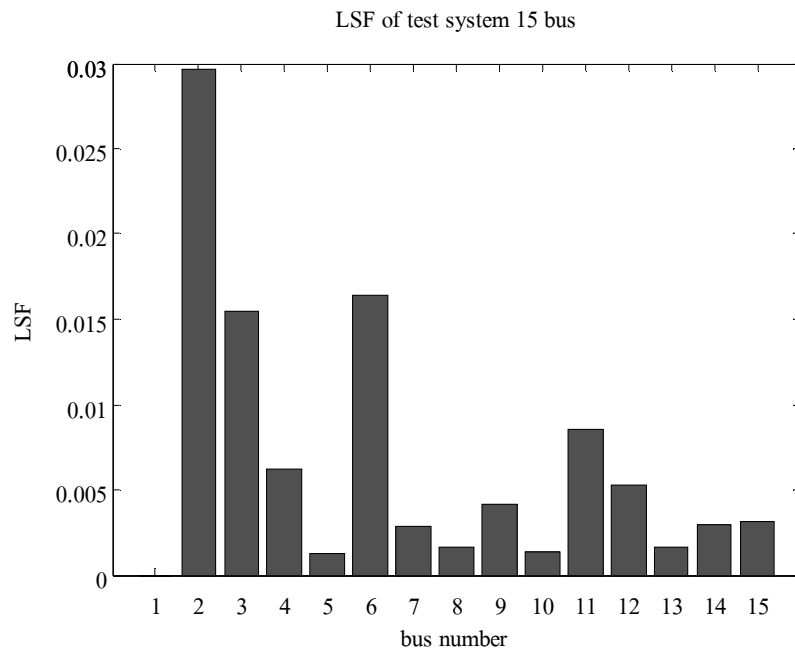
ส่วนที่ 1 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี LSF

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

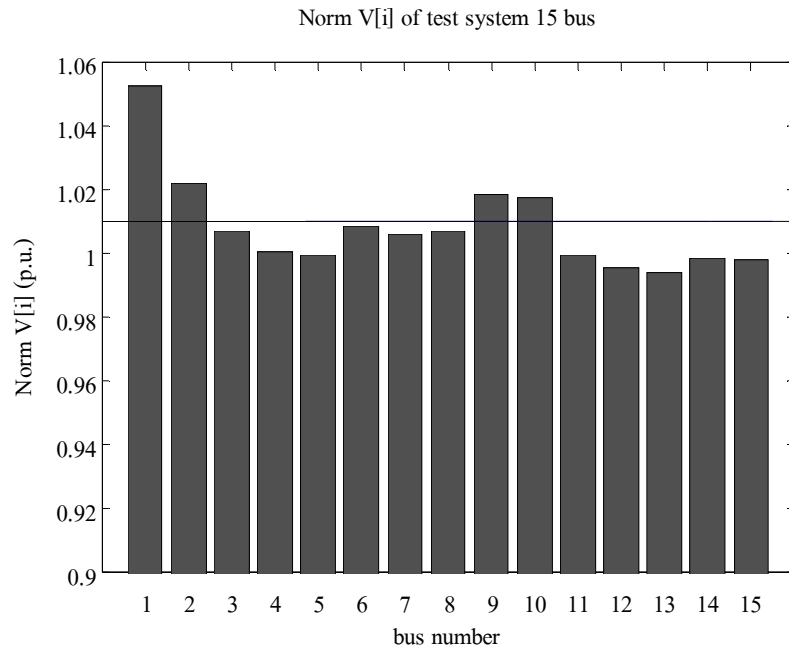
ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 15 บัสแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 10 อันดับแรก จากตารางที่ 4.2 บัสที่ 2 มีค่า LSF มากที่สุดจึงได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นบัสแรก แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 2 จะไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 6 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 2 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 6 พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 6 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 3 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 3 และเป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ ต่ำกว่า 1.01 บัสที่ 3 จึงถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 6 เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 10 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 6, 3, 11, 4, 12, 15, 14 และ 7 สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุเพียง 3 บัสเท่านั้น ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 6, 3 และ 11 ตามลำดับ ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 15 บัส สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.8 และค่านอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 15 บัส สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.2 ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 15 บัส

Bus No.	$\partial P_{line loss} / \partial Q_{eff}$	$V[i]/0.95$	Basecase voltage (p.u.)
2	0.029662	1.02240	0.97128
6	0.016438	1.00866	0.95823
3	0.015486	1.00702	0.95667
11	0.008526	0.99995	0.94995
4	0.006182	1.00095	0.95090
12	0.005266	0.99561	0.94583
9	0.004134	1.01892	0.96797
15	0.003142	0.99836	0.94844
14	0.002926	0.99853	0.94861
7	0.002811	1.00632	0.95601



รูปที่ 4.8 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 15 บัส



รูปที่ 4.9 นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 15 บัส

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

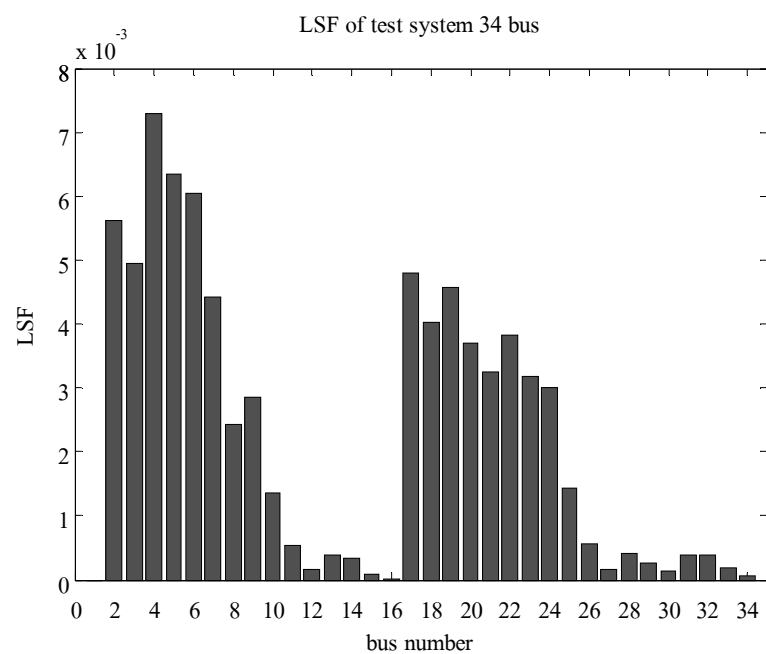
ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 34 บัสแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 15 อันดับแรก จากตารางที่ 4.3 บัสที่ 4 มีค่า LSF มากที่สุดจึงได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นบัสแรก แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 4 จะไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 2 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 5 พบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 5 จะไม่ได้รับการพิจารณาเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 6, 2, 3 และ 17 เป็นบัสที่มีค่า LSF สูงเป็นลำดับที่ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของแต่ละบัสพบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสดังกล่าวจะไม่ถูกเลือก บัสที่ 19 เป็นบัสที่มีค่า LSF อยู่ในลำดับที่ 7 เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 19 จึงเป็นบัสที่ได้รับการจัดลำดับความสำคัญเป็นลำดับที่ 1 ในการเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับระบบทดสอบ 34 บัส บัสที่ 7 และ 18 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 8 และ 9 ตามลำดับ แต่ค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสทั้ง 2 มีค่ามากกว่า 1.01 จึงไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้ง บัสที่ 22 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 10 และเป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ ต่ำกว่า 1.01 บัสที่ 22 จึงถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 19 บัสที่ 20 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 11 และเป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ ต่ำกว่า 1.01 บัสที่ 20 จึงถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 22 เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 15 อันดับแรก พบว่า บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 19, 22, 20, 21, 23 และ 24 ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุเพียง 3 บัสเท่านั้น สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 19, 22 และ 20 ตามลำดับ ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 34 บัสสามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.10 และค่านอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 34 บัสสามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.3 ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 34 บัส

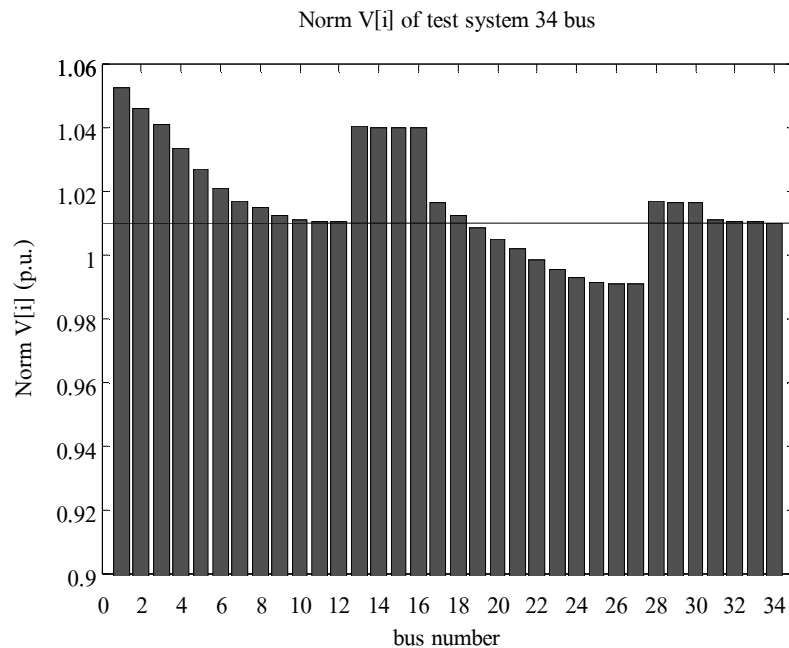
Bus No.	$\partial P_{line loss} / \partial Q_{eff}$	$V[i]/0.95$	Basecase voltage (p.u.)
4	0.007296	1.03374	0.98205
5	0.006344	1.02743	0.97606
6	0.006044	1.02149	0.97041
2	0.005623	1.04646	0.99414
3	0.004949	1.04107	0.98902

ตารางที่ 4.3 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 34 บัส (ต่อ)

Bus No.	$\partial P_{line loss} / \partial Q_{eff}$	$V[i]/0.95$	Basecase voltage (p.u.)
17	0.004799	1.01679	0.96595
19	0.004585	1.00858	0.95815
7	0.004414	1.01746	0.96659
18	0.004015	1.01289	0.96224
22	0.003837	0.99866	0.94872
20	0.003709	1.00511	0.95486
21	0.003240	1.00210	0.95199
23	0.003169	0.99583	0.94604
24	0.002992	0.99317	0.94351
9	0.002847	1.01265	0.96202



รูปที่ 4.10 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 34 บัส



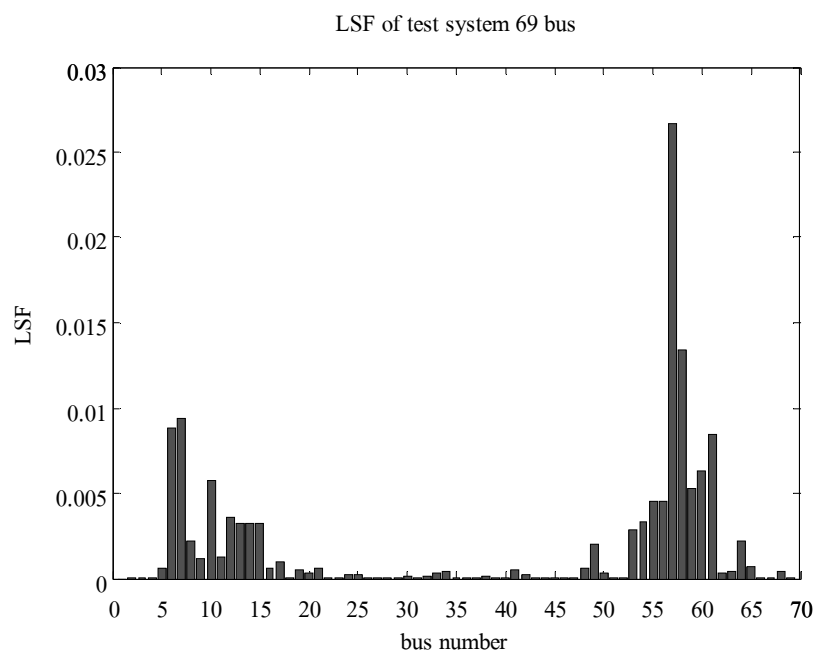
รูปที่ 4.11 นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 34 บัส

3) ระบบทดสอบ 69 บัส

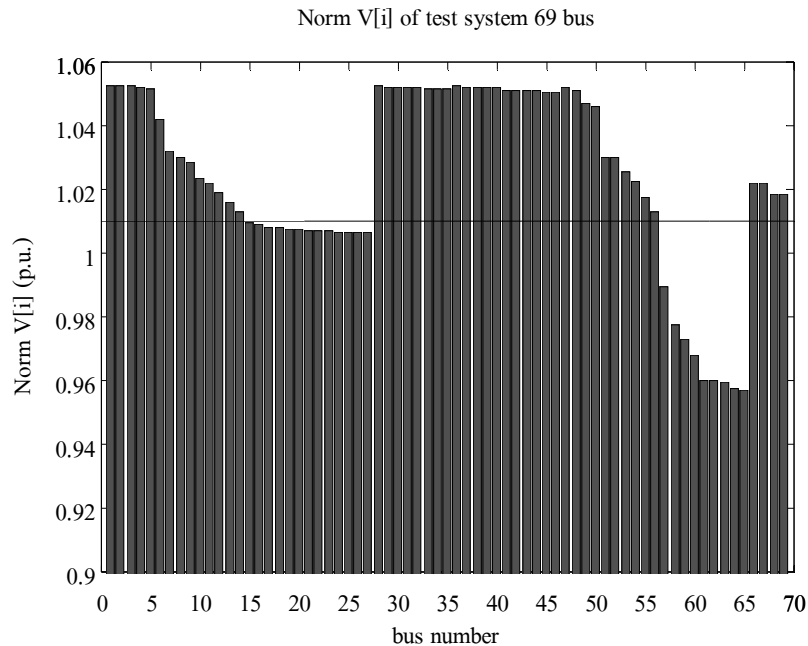
ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 69 บัสแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 12 อันดับแรก จากตารางที่ 4.4 บัสที่ 57 มีค่า LSF มากที่สุดจึงได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นบัสแรก เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 57 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 58 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 2 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 58 พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 58 จะถูกเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 57 บัสที่ 7 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 3 แต่เป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ มากกว่า 1.01 บัสที่ 7 จึงไม่ถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 12 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 57, 58, 61, 60 และ 59 สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุเพียง 4 บัสเท่านั้น ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 57, 58, 61 และ 60 ตามลำดับ ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 69 บัส สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.12 และค่านอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 69 บัส สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.4 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 69 บัส

Bus No.	$\partial P_{line loss} / \partial Q_{eff}$	$V[i]/0.95$	Basecase voltage (p.u.)
57	0.026648	0.98957	0.94010
58	0.013449	0.97793	0.92904
7	0.009357	1.03241	0.98079
6	0.008829	1.04219	0.99008
61	0.008483	0.96035	0.91234
60	0.006351	0.96814	0.91973
10	0.005718	1.02362	0.97244
59	0.005269	0.97343	0.92476
55	0.004568	1.01783	0.96694
56	0.004497	1.01323	0.96257
12	0.003600	1.01913	0.96818
54	0.003284	1.02254	0.97141



รูปที่ 4.12 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 69 บัส



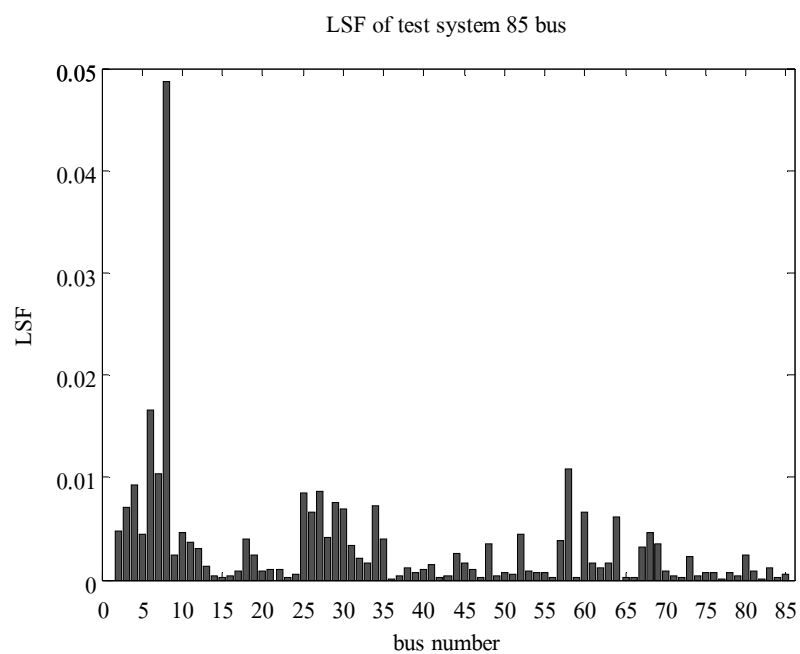
รูปที่ 4.13 นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 69 บัส

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

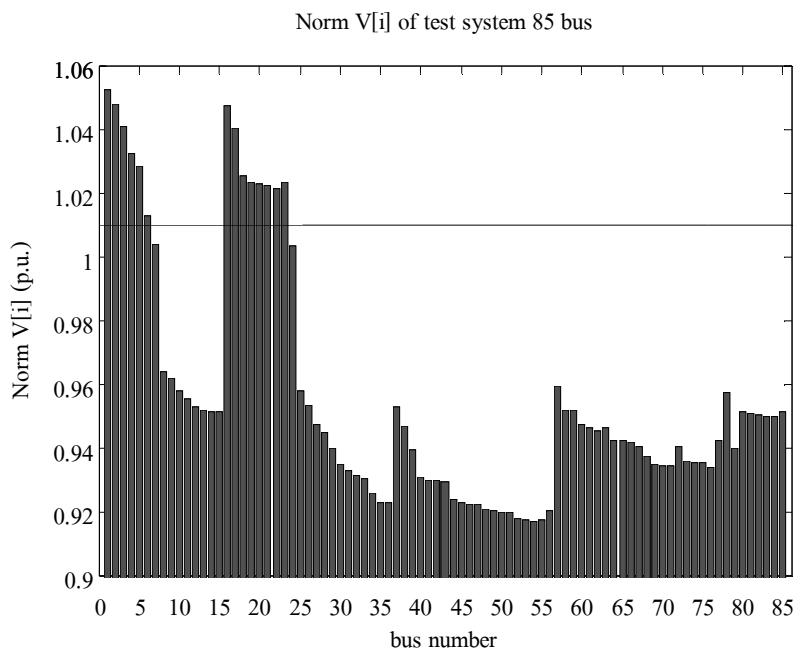
ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 85 บัส แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 10 อันดับแรก จากตารางที่ 4.5 บัสที่ 8 มีค่า LSF มากที่สุดจึงได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นบัสแรก เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 8 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 6 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 2 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 6 พบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 6 จะไม่ถูกเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 58 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 3 และเป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ น้อยกว่า 1.01 บัสที่ 58 จึงถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 8 บัสที่ 7 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 4 และเป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ น้อยกว่า 1.01 บัสที่ 7 จึงถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 58 เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 10 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 8, 58, 7, 27, 25, 29 และ 34 สำหรับระบบทดสอบ 85 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมด 4 บัส ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 8, 58, 7 และ 27 ตามลำดับ ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 85 บัส สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.14 และค่านอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 85 บัส สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 85 บัส

Bus No.	$\partial P_{line loss} / \partial Q_{eff}$	$V[i]/0.95$	Basecase voltage (p.u.)
8	0.048651	0.96403	0.91583
6	0.016557	1.01344	0.96277
58	0.010764	0.95225	0.90464
7	0.010367	1.00417	0.95396
4	0.009208	1.03271	0.98108
27	0.008700	0.94781	0.90042
25	0.008457	0.95819	0.91028
29	0.007551	0.94003	0.89303
34	0.007274	0.92607	0.87976
3	0.007117	1.04133	0.98926



รูปที่ 4.14 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 85 บัส



รูปที่ 4.15 นอร์มของ $V[i]$ ของระบบทดสอบ 85 บัส

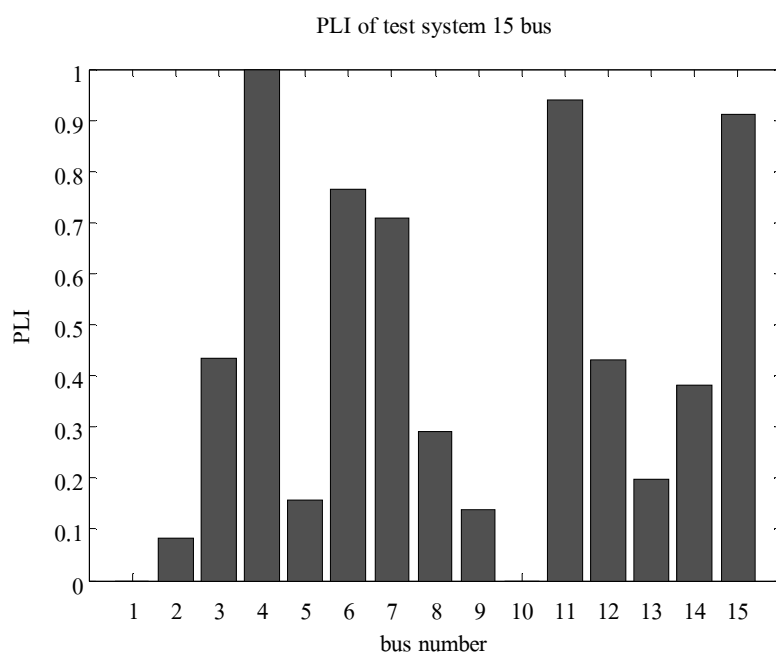
ส่วนที่ 2 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี PLI

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 15 บัสแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า PLI สูงที่สุด 12 อันดับแรก จากตารางที่ 4.6 เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 349.20 kVar ที่บัส 4 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 15.28 kW ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ดังนั้น บัสที่ 4 จึงมีค่า PLI มากที่สุด คือ 1.00 จึงทำให้ได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับแรก ดังนั้น บัสที่ 4 จะได้รับการพิจารณาเป็นบัสแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 332.79 kVar ที่บัส 11 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 14.54 kW โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงอยู่ในลำดับที่ 2 ทำให้บัสที่ 11 มีค่า PLI เป็นลำดับที่ 2 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 2 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 341.00 kVar ที่บัส 6 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 12.43 kW ซึ่งมีค่าลดลงน้อยกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 11 และ 15 ทั้งที่ขนาดของตัวเก็บประจุในการชดเชยมีค่ามากกว่า แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งไม่เหมาะสมย่อมไม่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงได้มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า PLI สูงที่สุด 12 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 4, 11, 15, 6, 7, 3, 12, 14, 8, 13, 5 และ 9 สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมด 3 บัส ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 4, 11 และ 15 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 คำนวณ PLI ของระบบทดสอบ 15 บัส

Bus No.	Power loss after compensation (kW)	Loss reduction (kW)	Power loss index (PLI)	Capacitor size (kVar)
4	46.5155	15.2789	1.0000	349.1963
11	47.2589	14.5355	0.9387	332.7852
15	47.6000	14.1944	0.9106	320.3588
6	49.3682	12.4262	0.7648	340.9976
7	50.0587	11.7357	0.7079	317.1985
3	53.3566	8.4378	0.4361	192.4514
12	53.3985	8.3959	0.4326	158.8510
14	54.0092	7.7852	0.3823	156.0787
8	55.1200	6.6744	0.2907	154.3963
13	56.2441	5.5503	0.1981	97.6325
5	56.7327	5.0617	0.1578	97.2680
9	56.9470	4.8474	0.1401	155.5235



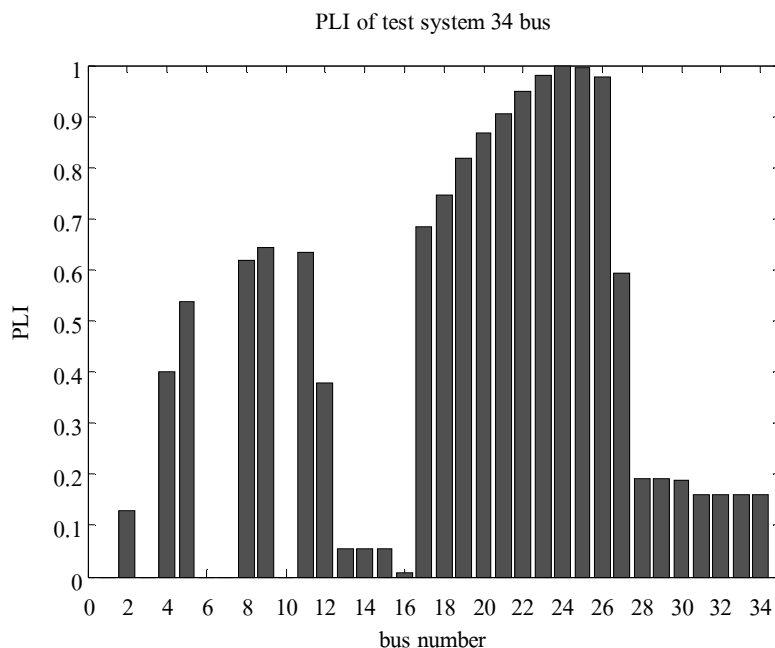
รูปที่ 4.16 คำนวณ PLI ของระบบทดสอบ 15 บัส

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ดัชนี *PLI* ของระบบทดสอบ 34 บัส แสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 10 อันดับแรก จากตารางที่ 4.7 เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 270.43 kVar ที่บัส 24 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 15.91 kW ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ดังนั้น บัสที่ 24 จึงมีค่า *PLI* มากที่สุด คือ 1.00 จึงทำให้ได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับแรก ดังนั้น บัสที่ 4 จะได้รับการพิจารณาเป็นบัสแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 263.75 kVar ที่บัส 25 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 15.83 kW โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงอยู่ในลำดับที่ 2 ทำให้บัสที่ 25 มีค่า *PLI* เป็นลำดับที่ 2 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 2 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 276.71 kVar ที่บัส 23 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 15.57 kW ซึ่งมีค่าลดลงน้อยกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24 และ 25 ทั้งที่ขนาดของตัวเก็บประจุในการชดเชยมีค่ามากกว่า แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งไม่เหมาะสมย่อมไม่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงได้มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 10 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 24, 25, 23, 26, 22, 21, 20, 19, 18 และ 17 สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมด 3 บัส ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24, 25 และ 23 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ดัชนี *PLI* ของระบบทดสอบ 34 บัส

Bus No.	Power loss after compensation (kW)	Loss reduction (kW)	Power loss index (<i>PLI</i>)	Capacitor size (kVar)
24	205.8123	15.9112	1.0000	270.4336
25	205.8899	15.8336	0.9951	263.7523
23	206.1556	15.5679	0.9784	276.7081
26	206.1886	15.5349	0.9764	256.8457
22	206.6185	15.1050	0.9493	282.9525
21	207.3252	14.3983	0.9049	289.0285
20	207.9305	13.7930	0.8669	295.2493
19	208.7241	12.9994	0.8170	301.3428
18	209.8336	11.8899	0.7473	307.1985
17	210.8302	10.8933	0.6846	313.1926



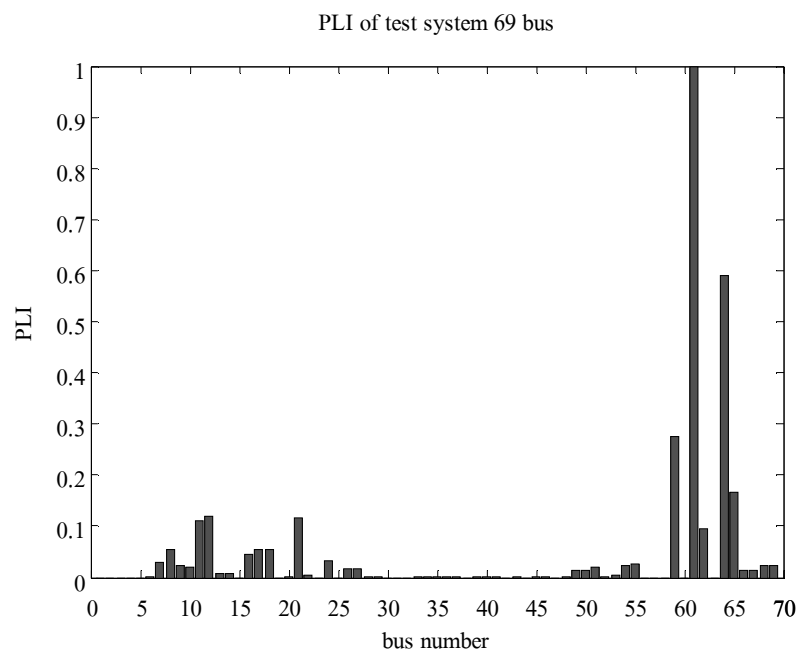
รูปที่ 4.17 คำนวณ *PLI* ของระบบทดสอบ 34 บัส

3) ระบบทดสอบ 69 บัส

ดัชนี *PLI* ของระบบทดสอบ 69 บัส แสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 12 อันดับแรก จากตารางที่ 4.8 เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 2042.24 kVar ที่บัส 61 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 53.41 kW ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ดังนั้น บัสที่ 61 จึงมีค่า *PLI* มากที่สุด คือ 1.00 จึงทำให้ได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับแรก ดังนั้น บัสที่ 61 จะได้รับการพิจารณาเป็นบัสแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 318.74 kVar ที่บัส 64 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 31.54 kW โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงอยู่ในลำดับที่ 2 ทำให้บัสที่ 64 มีค่า *PLI* เป็นลำดับที่ 2 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 2 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 195.26 kVar ที่บัส 12 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 6.37 kW ซึ่งมีค่าลดลงน้อยกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 59 และ 65 ทั้งที่ขนาดของตัวเก็บประจุในการชดเชยมีค่ามากกว่า แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งไม่เหมาะสมย่อมไม่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงได้มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 12 อันดับแรกพบว่าบัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 61, 64, 59, 65, 12, 21, 11, 62, 8, 18, 17 และ 16 สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมด 4 บัส ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 61, 64, 59 และ 65 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 คำนวณ PLI ของระบบทดสอบ 69 บัส

Bus No.	Power loss after compensation (kW)	Loss reduction (kW)	Power loss index (PLI)	Capacitor size (kVar)
61	171.5950	53.4078	1.0000	2042.2446
64	193.4638	31.5390	0.5905	318.7356
59	210.3398	14.6630	0.2745	165.2483
65	216.0455	8.9573	0.1677	80.1115
12	218.6369	6.3659	0.1192	195.2615
21	218.7110	6.2918	0.1178	148.7103
11	219.0495	5.9533	0.1115	200.6163
62	219.9802	5.0226	0.0940	45.3233
8	222.0128	2.9900	0.0560	130.7584
18	222.1120	2.8908	0.0541	63.4966
17	222.1212	2.8816	0.0540	63.2939
16	222.5489	2.4539	0.0459	54.5322



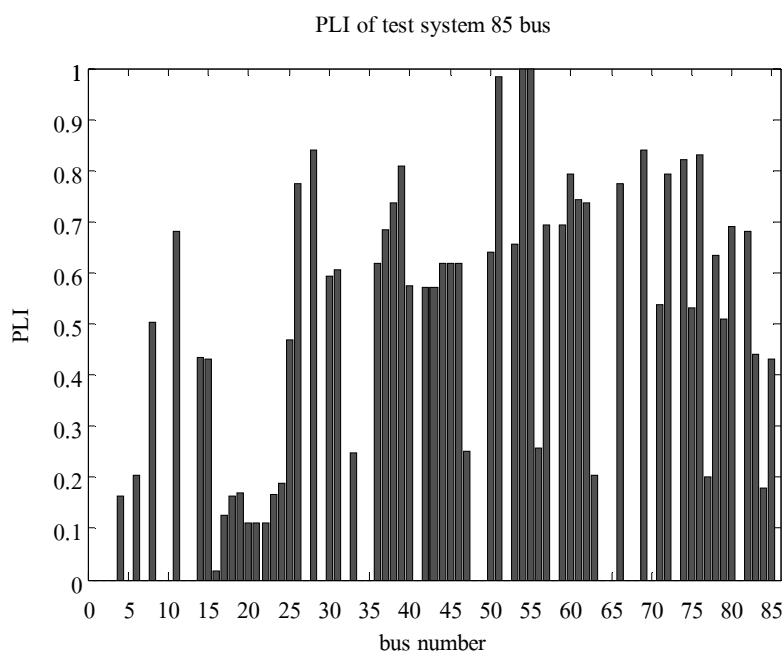
รูปที่ 4.18 คำนวณ PLI ของระบบทดสอบ 69 บัส

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

ดัชนี *PLI* ของระบบทดสอบ 85 บัส แสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 10 อันดับแรก จากตารางที่ 4.9 เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 130.66 kVar ที่บัส 54 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 24.94 kW ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ดังนั้น บัสที่ 54 จึงมีค่า *PLI* มากที่สุด คือ 1.00 จึงทำให้ได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับแรก ดังนั้น บัสที่ 54 จะได้รับการพิจารณาเป็นบัสแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 130.59 kVar ที่บัส 55 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 24.88 kW โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงอยู่ในลำดับที่ 2 ทำให้บัสที่ 55 มีค่า *PLI* เป็นลำดับที่ 2 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 2 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 130.71 kVar ที่บัส 69 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 20.97 kW ซึ่งมีค่าลดลงน้อยกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 54 และ 55 ทั้งที่ขนาดของตัวเก็บประจุในการชดเชยมีค่ามากกว่า แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งไม่เหมาะสมย่อมไม่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงได้มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 10 อันดับแรกพบว่าบัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 54, 55, 51, 69, 28, 76, 74, 39, 60 และ 72 สำหรับระบบทดสอบ 85 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมด 4 บัส ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 54, 55, 51 และ 69 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ดัชนี *PLI* ของระบบทดสอบ 85 บัส

Bus No.	Power loss after compensation (kW)	Loss reduction (kW)	Power loss index (<i>PLI</i>)	Capacitor size (kVar)
54	290.7839	24.9359	1.0000	130.6553
55	290.8409	24.8789	0.9977	130.5881
51	291.2329	24.4869	0.9820	130.3405
69	294.7536	20.9662	0.8408	130.7077
28	294.7899	20.9299	0.8393	141.3205
76	295.0038	20.7160	0.8308	128.8127
74	295.2609	20.4589	0.8205	128.6523
39	295.5707	20.1491	0.8080	128.2353
60	295.9419	19.7779	0.7931	138.7645
72	295.9730	19.7468	0.7919	128.1760



รูปที่ 4.19 คำนวณ *PLI* ของระบบทดสอบ 85 บัส

ส่วนที่ 3 การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุสามารถทำได้โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ตัวแปรที่สำคัญและค่าของตัวแปรที่เลือกใช้แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

ตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมใน MATLAB	ค่าของตัวแปรจินเนติกอัลกอริทึมที่เลือกใช้
PopulationType	doubleVector
PopulationSize	100
CrossoverFraction	0.8
Generations	100
StallGenLimit	100
StallTimeLimit	inf
CrossoverFcn	crossoverscattered
MutationFcn	mutationgaussian

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ระบบทดสอบ 15 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาขนาดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.11 เมื่อใช้ดัชนี *LSF* เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่า บัสที่ 6, 3 และ 11 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาด 396.13, 565.53 และ 260.69 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 1222.35 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 4, 11 และ 15 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 408.80, 356.47 และ 200 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 965.27 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนด (LTT) พบว่าตัวเก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 6, 4 และระหว่างบัสที่ 11 กับ 12 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 11 เป็นระยะ 0.89 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 11 และ 12 และขนาดของตัวเก็บประจุ คือ 416.95, 550 และ 212.19 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 1179.14 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย แสดงในตารางที่ 4.12 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 8 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.12 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 13 คือ 0.94452 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่าบัสที่ 13 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.96992 p.u. ขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้น เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าบัสที่ 13 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.96931 p.u. และขนาดแรงดันต่ำสุดอยู่ที่บัสที่ 7 มีค่า 0.96737 p.u. แรงดันบัสหลังการชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนดพบว่าบัสที่ 13 มีขนาดแรงดันต่ำที่สุด คือ 0.97101 p.u. เมื่อพิจารณาในภาพรวม ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนดทำให้ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากตารางที่ 4.13 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 3 ตำแหน่ง แต่วิธี *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LTT* และ *LSF* ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนี *PLI* อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มากเกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลง ขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส ทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 4.13 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 61.7944 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี *LTT* มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 30.4088 kW วิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 31.4843 kW และวิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 35.1133 kW ดัชนี *LSF* และ *PLI* หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส แสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 15 บัส

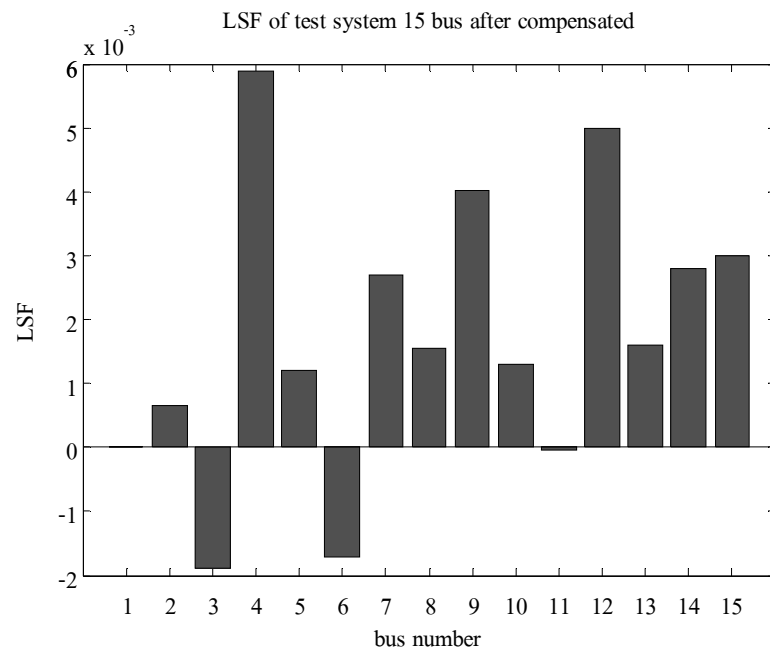
<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		LTT		
Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	α	Capacitor size (kVar)
6	396.13	4	408.80	6	0.00	416.95
3	565.53	11	356.47	11 – 12	0.89	212.19
11	260.69	15	200.00	4	0.00	550.00
Total	1222.35	Total	965.27	Total		1179.14

ตารางที่ 4.12 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 15 บัส

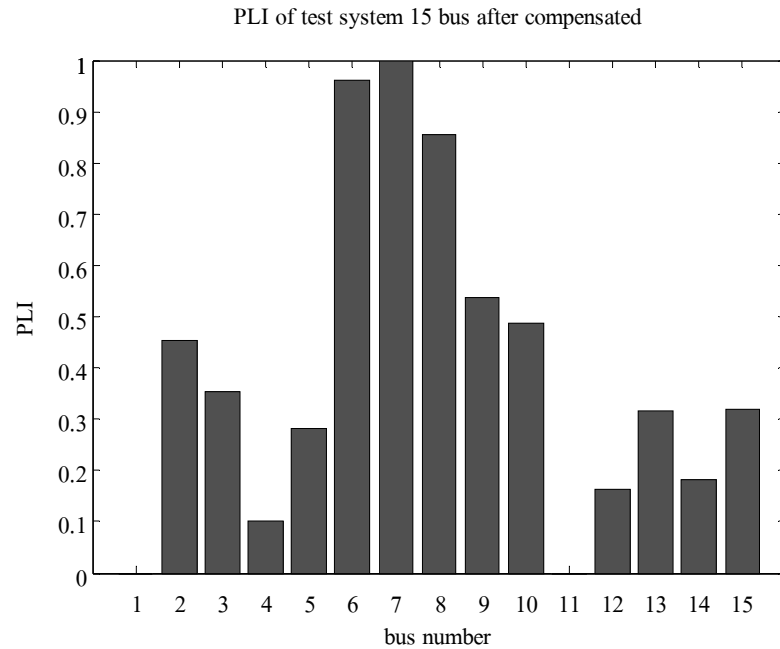
Before compensation		After compensation (<i>LSF</i>)		After compensation (<i>PLI</i>)		After compensation (LTT)	
Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)
13	0.94452	13	0.96992	7	0.96737	13	0.97101
12	0.94583	15	0.97105	8	0.96830	12	0.97229
15	0.94844	12	0.97120	13	0.96931	11	0.97366
14	0.94861	14	0.97121	6	0.96957	15	0.97384
5	0.94992	5	0.97249	12	0.97058	14	0.97400
11	0.94995	4	0.97345	15	0.97371	5	0.97528
4	0.95090	11	0.97521	11	0.97460	7	0.97603
7	0.95601	7	0.97619	5	0.97515	4	0.97624

ตารางที่ 4.13 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส

Characteristics/Methods	<i>LSF</i>	<i>PLI</i>	LTT
No. of selected locations	3	3	3
Total compensation (kVar)	1222.35	965.27	1179.14
Losses before compensation (kW)	61.7944	61.7944	61.7944
Losses after compensation (kW)	31.4843	35.1133	30.4088
Reduction of losses after compensation	49.05%	43.18%	50.79%



รูปที่ 4.20 คำนวณ LSF หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส



รูปที่ 4.21 คำนวณ PLI หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 15 บัส

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ระบบทดสอบ 34 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาขนาดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.14 เมื่อใช้ดัชนี *LSF* เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่าบัสที่ 19, 22 และ 20 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาด 957.88, 861.38 และ 228.69 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2047.95 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24, 25 และ 23 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 200, 335.98 และ 982.13 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 1518.11 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่า ตัวเก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 19, 9 และระหว่างบัสที่ 25 กับ 26 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 25 เป็นระยะ 0.13 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 25 และ 26 และขนาดของตัวเก็บประจุ คือ 949, 806 และ 666 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2421 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชยแสดงในตารางที่ 4.15 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 8 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.15 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 27 คือ 0.94169 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่า บัสที่ 27 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.94953 p.u. และขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้น เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่า บัสที่ 27 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.94945 p.u. แรงดันบัสหลังการชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดพบว่า บัสที่ 27 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.95027 p.u. เมื่อพิจารณาในภาพรวม ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากตารางที่ 4.16 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 3 ตำแหน่ง แต่วิธี *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LSF* และ LTT ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนี *PLI* อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มากเกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลงขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส ทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 4.16 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 221.7235 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี LTT มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 160.4264 kW วิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 168.8133 kW และวิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 173.8826 kW ดัชนี *LSF* และ *PLI* หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส แสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.14 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 34 บัส

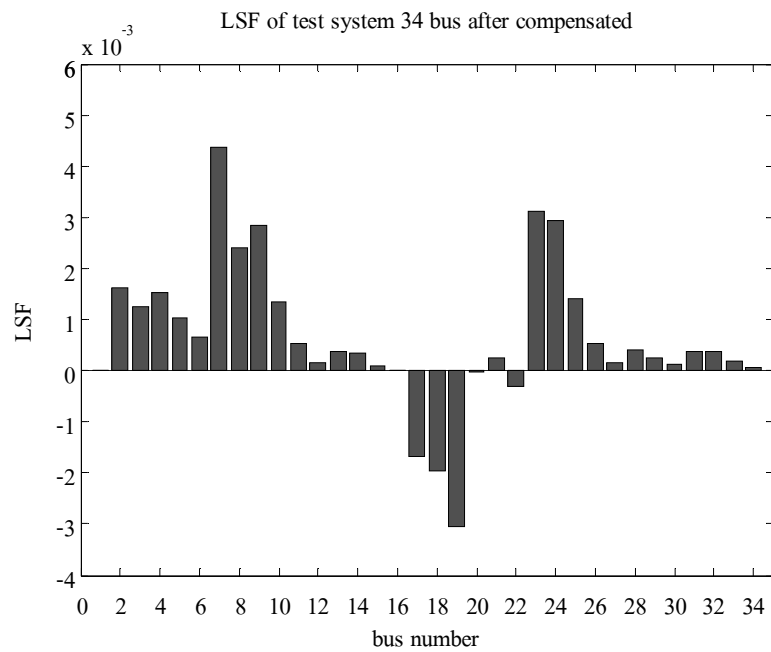
<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		LTT		
Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	α	Capacitor size (kVar)
19	957.88	24	200.00	19	0.00	949.00
22	861.38	25	335.98	9	0.00	806.00
20	228.69	23	982.13	25 – 26	0.13	666.00
Total	2047.95	Total	1518.11	Total		2421.00

ตารางที่ 4.15 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 34 บัส

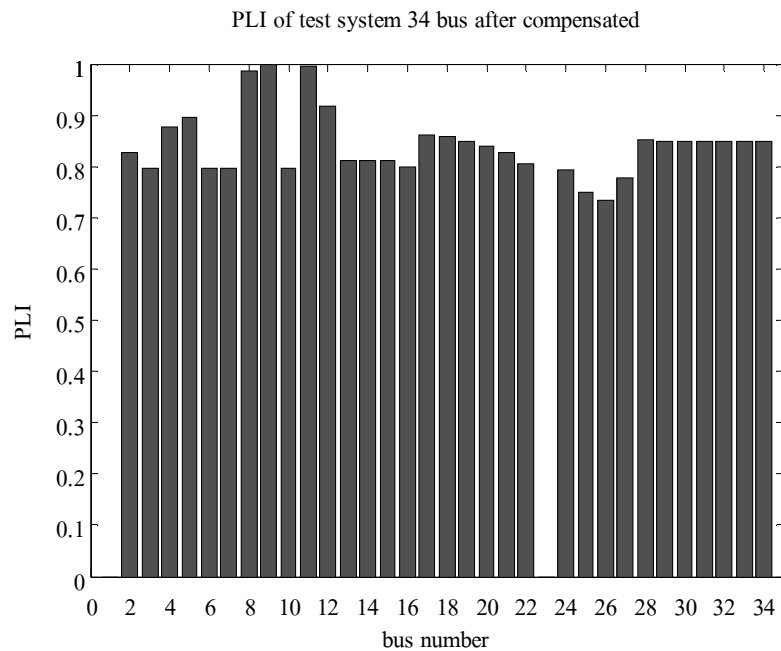
Before compensation		After compensation (<i>LSF</i>)		After compensation (<i>PLI</i>)		After compensation (LTT)	
Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)
27	0.94169	27	0.94953	27	0.94945	27	0.95027
26	0.94183	26	0.94967	26	0.94959	26	0.95041
25	0.94230	25	0.95013	25	0.95005	25	0.95086
24	0.94351	24	0.95134	24	0.95115	24	0.95185
23	0.94604	23	0.95384	23	0.95340	23	0.95404
22	0.94872	22	0.95651	22	0.95548	22	0.95645
21	0.95199	21	0.95941	21	0.95813	21	0.95942
20	0.95486	20	0.96193	20	0.96042	20	0.96201

ตารางที่ 4.16 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส

Characteristics/Methods	<i>LSF</i>	<i>PLI</i>	LTT
No. of selected locations	3	3	3
Total compensation (kVar)	2047.95	1518.11	2421.00
Losses before compensation (kW)	221.7235	221.7235	221.7235
Losses after compensation (kW)	168.8133	173.8826	160.4264
Reduction of losses after compensation	23.86%	21.58%	27.65%



รูปที่ 4.22 คำนวณ LSF หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส



รูปที่ 4.23 คำนวณ PLI หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส

3) ระบบทดสอบ 69 บัส

ระบบทดสอบ 69 บัส เป็นระบบทดสอบ 12.66 kV 100 kVA สำหรับการค้นหาขนาดที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.17 เมื่อใช้ดัชนี *LSF* เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่าบัสที่ 57, 58, 61 และ 60 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาด 200, 200, 878.72 และ 200 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 1478.72 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 61, 64, 59 และ 65 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่า ขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 722.50, 200, 253.85 และ 200 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 1376.35 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่า ตัวเก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 61, 21, 8 และระหว่างบัสที่ 11 กับ 12 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 11 เป็นระยะ 0.82 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 11 และ 12 และขนาดของตัวเก็บประจุ คือ 1199.75, 216, 318.25 และ 269.75 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2003.75 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย แสดงในตารางที่ 4.18 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 7 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.18 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 65 คือ 0.90919 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่า บัสที่ 65 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.93098 p.u. ขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้น เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่า บัสที่ 65 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.93279 p.u. และขนาดแรงดันต่ำสุดอยู่ที่บัสที่ 64 มีค่า 0.93264 p.u. แรงดันบัสหลังการชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดพบว่า บัสที่ 65 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.93141 p.u. เมื่อพิจารณาในภาพรวม ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากตารางที่ 4.19 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 4 ตำแหน่ง แต่วิธี *LSF* และ *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี LTT ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนีทั้ง 2 อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มากเกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลง ทำให้ขนาดที่ค้นหาได้จำกัดอยู่ที่ค่าต่ำที่สุด คือ 200 kVar ถึง 3 ตำแหน่ง ขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส ทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 4.19 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 221.7235 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี LTT มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 160.4264 kW วิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 168.8133 kW และวิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 173.8826 kW ดัชนี *LSF* และ *PLI* หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส แสดงได้ดังในรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.17 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 69 บัส

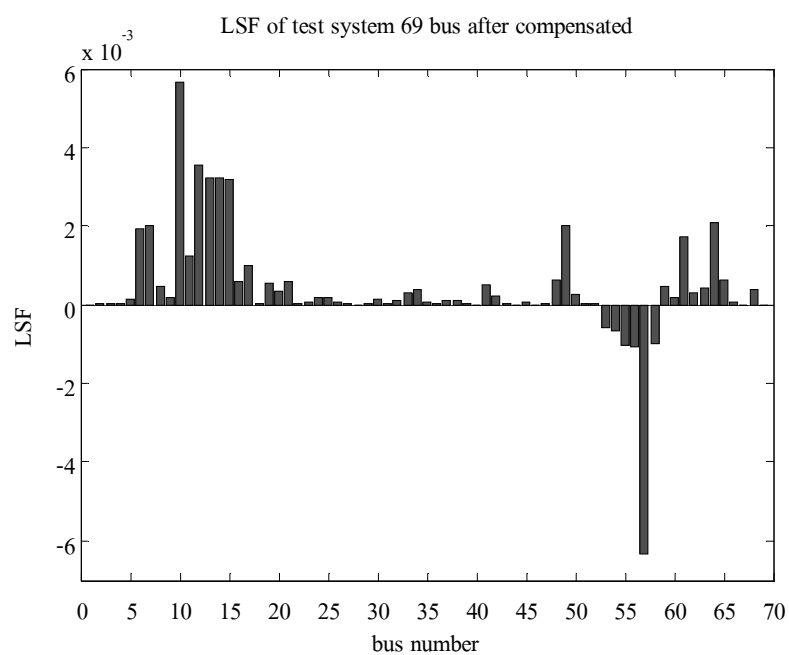
<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		LTT		
Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	α	Capacitor size (kVar)
57	200.00	61	722.50	61	0.00	1199.75
58	200.00	64	200.00	21	0.00	216.00
61	878.72	59	253.85	8	0.00	318.25
60	200.00	65	200.00	11 – 12	0.82	269.75
Total	1478.72	Total	1376.35	Total		2003.75

ตารางที่ 4.18 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 69 บัส

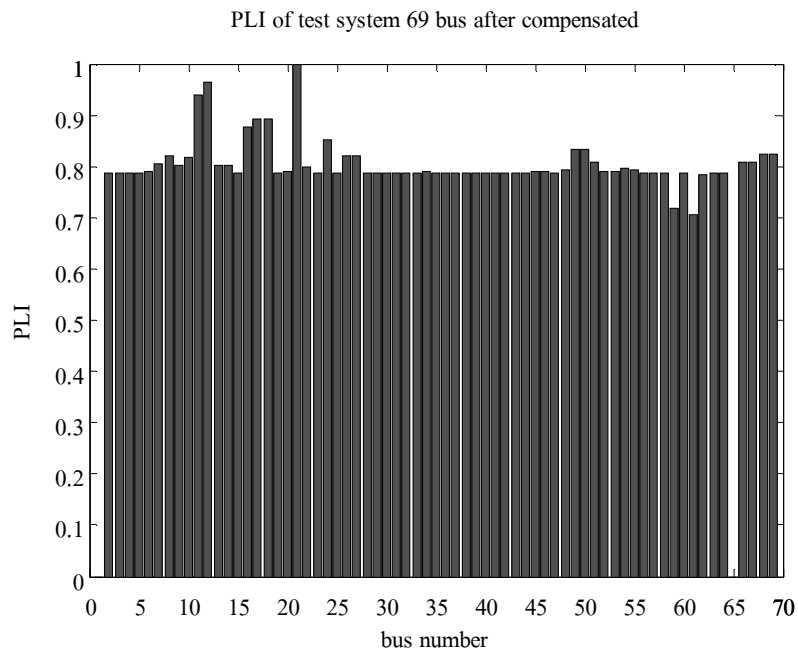
Before compensation		After compensation (<i>LSF</i>)		After compensation (<i>PLI</i>)		After compensation (LTT)	
Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)
65	0.90919	65	0.93098	64	0.93264	65	0.93141
64	0.90976	64	0.93154	65	0.93279	64	0.93197
63	0.91166	63	0.93340	63	0.93353	63	0.93382
62	0.91205	62	0.93378	62	0.93371	62	0.93420
61	0.91234	61	0.93406	61	0.93386	61	0.93448
60	0.91973	60	0.93977	60	0.93916	60	0.93964
59	0.92476	59	0.94383	59	0.94319	59	0.94361

ตารางที่ 4.19 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส

Characteristics/Methods	<i>LSF</i>	<i>PLI</i>	LTT
No. of selected locations	4	4	4
Total compensation (kVar)	1478.72	1376.35	2003.75
Losses before compensation (kW)	225.0028	225.0028	225.0028
Losses after compensation (kW)	151.6957	151.8203	144.8742
Reduction of losses after compensation	32.58%	32.53%	35.61%



รูปที่ 4.24 คำนวณ LSF หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส



รูปที่ 4.25 คำนวณ PLI หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

ระบบทดสอบ 85 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาขนาดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.20 เมื่อใช้ดัชนี *LSF* เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่า บัสที่ 8, 58, 7 และ 27 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาด 565.5, 710.88, 316.50 และ 878.25 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2471.13 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 54, 55, 51 และ 69 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่า ขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 200, 200, 407.23 และ 736.62 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 1543.85 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่า ตัวเก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 67, 11, 35 และ 27 ขนาดของตัวเก็บประจุ คือ 598, 556, 509 และ 532 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2195 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย แสดงในตารางที่ 4.21 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 7 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.21 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 54 คือ 0.87143 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่า บัสที่ 54 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.91567 p.u. ขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้น เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่า บัสที่ 54 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.91815 p.u. และขนาดแรงดันต่ำสุดอยู่ที่บัสที่ 47 มีค่า 0.91631 p.u. แรงดันบัสหลังการชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดพบว่า บัสที่ 54 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.92176 p.u. เมื่อพิจารณาในภาพรวม ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากตารางที่ 4.22 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 4 ตำแหน่ง แต่วิธี *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LSF* และ *LTT* ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนี *PLI* อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มากเกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลง ทำให้ขนาดที่ค้นหาได้จำกัดอยู่ที่ค่าต่ำที่สุด คือ 200 kVar จำนวน 2 ตำแหน่ง ขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัสทั้ง 3 วิธีแสดงในตารางที่ 4.22 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 221.7235 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี *LTT* มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 160.4264 kW วิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 168.8133 kW และวิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 173.8826 kW ดัชนี *LSF* และ *PLI* หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัสแสดงในรูปแผนภูมิแท่งได้ดังในรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 85 บัส

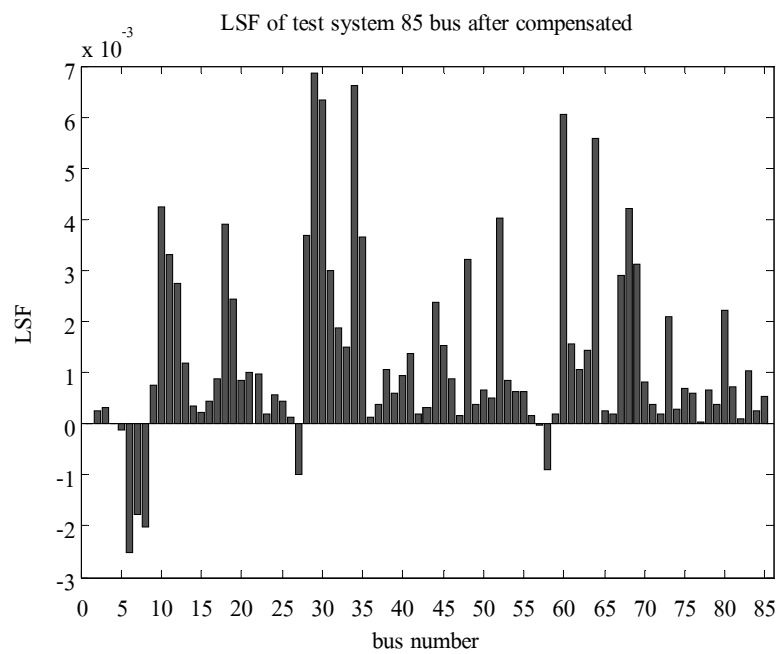
<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		LTT		
Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	α	Capacitor size (kVar)
8	565.50	54	200.00	67	0.00	598.00
58	710.88	55	200.00	11	0.00	556.00
7	316.50	51	407.23	35	0.00	509.00
27	878.25	69	736.62	27	0.00	532.00
Total	2471.13	Total	1543.85	Total		2195.00

ตารางที่ 4.21 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 85 บัส

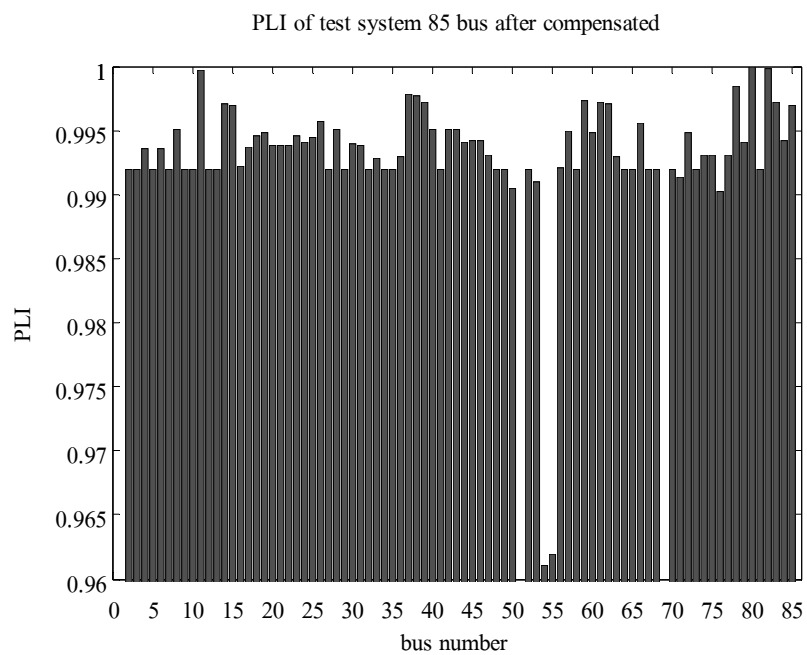
Before compensation		After compensation (<i>LSF</i>)		After compensation (<i>PLI</i>)		After compensation (LTT)	
Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)
54	0.87143	54	0.91567	47	0.91631	54	0.92176
53	0.87185	53	0.91606	46	0.91641	53	0.92215
55	0.87200	55	0.91620	45	0.91699	55	0.92229
52	0.87241	52	0.91659	44	0.91798	52	0.92268
51	0.87408	51	0.91818	53	0.91814	51	0.92426
50	0.87442	50	0.91851	54	0.91815	50	0.92458
56	0.87476	56	0.91884	52	0.91833	56	0.92491

ตารางที่ 4.22 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัส

Characteristics/Methods	<i>LSF</i>	<i>PLI</i>	LTT
No. of selected locations	4	4	4
Total compensation (kVar)	2471.13	1543.85	2195.00
Losses before compensation (kW)	315.7198	315.7198	315.7198
Losses after compensation (kW)	162.4796	177.0037	148.8762
Reduction of losses after compensation	48.54%	43.94%	52.85%



รูปที่ 4.26 คำนวณ LSF หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัส



รูปที่ 4.27 คำนวณ PLI หลังการชดเชยของระบบทดสอบ 85 บัส

4.6 สรุป

การเลือกตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจะช่วยให้แรงดันในระบบมีค่าสูงขึ้นพร้อมทั้งทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบมีค่าลดลง สำหรับการเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาจากค่า LSF ทำได้โดยการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งบัสที่มีค่า LSF สูง และมีแรงดันต่ำหรืออาจเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งบัสที่มีค่า PLI สูง ๆ ก็ได้ นอกจากนี้การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุสามารถทำได้พร้อม ๆ กันโดยการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดร่วมกับการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด ผลการทดสอบพบว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้าทำให้แรงดันโดยรวมมีค่ามากขึ้นและกำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่หาโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบลดลงมากที่สุด

บทที่ 5

ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM ที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

5.1 บทนำ

การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าถึงแม้จะเป็นวิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ความนิยมอย่างมากก็ตาม แต่ตัวเก็บประจุก็ไม่อาจช่วยให้ระบบโดยรวมดีขึ้นมากนัก อีกทั้งเมื่อเกิด เหตุการณ์ที่ระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติหรือเกิดแรงดันตกมาก ๆ เนื่องจากปริมาณโหลดที่มาก เกินไป ตัวเก็บประจุไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ในสภาวะปกติหรือใกล้เคียงกับ สภาวะปกติได้ ดังนั้นการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพมากกว่าจึงถูก นำมาใช้ แต่ปัญหาที่สำคัญ คือ ตำแหน่งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยที่จะติดตั้งเข้าในระบบ

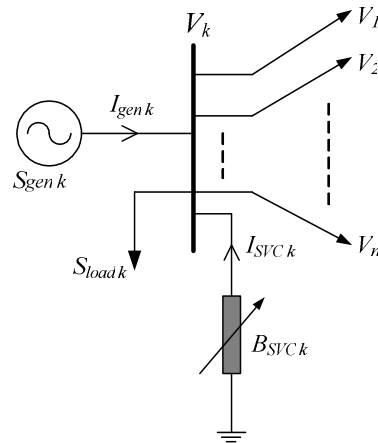
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดร่วมกับจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหา ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า 2 ชนิด คือ SVC และ D-STATCOM โดย พิจารณาจากค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าในระบบ หาตำแหน่งติดตั้งและ ขนาดที่เหมาะสมในการชดเชยในสภาวะโหลดปกติ และสภาวะโหลดหนัก ดังนี้

5.2 แบบจำลอง SVC

อุปกรณ์ชดเชย SVC ในรูปที่ 5.1 จะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าชั้สเชปแทนซ์ปรับค่าได้ โดยสามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในตัวเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นกับการปรับตั้งของผู้ดูแลระบบ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อชดค่ากำลังงานสูญเสียในสภาวะ โหลดปกติและสภาวะโหลดหนัก กรณีที่ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบค่าชั้สเชปแทนซ์คำนวณได้ จากสมการที่ (5-1) และกรณีที่ SVC รับกำลังไฟฟ้าจากระบบค่าชั้สเชปแทนซ์คำนวณได้จากสมการ ที่ (5-2)

$$B_{SVC} = \frac{1}{X_C} \quad (5-1)$$

$$B_{SVC} = -\frac{1}{X_L} \quad (5-2)$$



รูปที่ 5.1 ตัวชดเชยค่าซัสเซปแตนซ์ปรับค่าได้ของ SVC ที่บัส k ใด ๆ

พิจารณาจากรูปที่ 5.1 SVC ถูกติดตั้งที่บัส k ใด ๆ เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ต้องถูกดัดแปลงในตำแหน่งตามแนวทแยงมุมของบัสที่มี SVC ต่ออยู่ เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ที่บัส k จะถูกปรับปรุง ดังนี้

$$[\mathbf{Y}_{bus}]_{k,k}^{(new)} = [\mathbf{Y}_{bus}]_{k,k}^{(old)} + j[\mathbf{B}_{SVC,k}] \quad (5-3)$$

5.3 แบบจำลอง D-STATCOM

แบบจำลองอุปกรณ์ชดเชย D-STATCOM ในสถานะคงตัวถูกเขียนแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับรีแอคแตนซ์ภายในของ D-STATCOM ดังรูปที่ 5.2 สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด แบบจำลอง D-STATCOM ในสถานะคงตัวจะถูกเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลอันดับซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับค่ารีแอคแตนซ์ โดยกระแสที่ฉีดโดย D-STATCOM คำนวณได้ดังนี้

$$I_s = \frac{E_s}{jX_s} \quad (5-4)$$

$$B_{SVC,min} = -\frac{1}{X_L} = -\frac{Q_{SVC,min}}{V_{rated}^2} = -\frac{5000 \text{ kVar}}{V_{rated}^2} \quad (5-6)$$

สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (5-7)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && P_{loss} = I^2 R \\ &\text{subject to} && B_{SVC,min} \leq B_{SVC} \leq B_{SVC,max} \quad \text{p.u.} \end{aligned} \quad (5-7)$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ
 B_{SVC} คือ ค่าชั้สเซปแดนซ์ของ SVC
 Q_{SVC} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดย SVC
 V_{rated} คือ พิกัดแรงดันของระบบ

กรณี D-STATCOM กำหนดให้จ่ายแรงดันเข้าสู่ระบบในช่วง 1.00-1.05 p.u. และ X_s มีค่าอยู่ในช่วง 2-10 Ω ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{s,max} = \frac{1.05}{jX_{s,min}} \quad (5-8)$$

$$I_{s,min} = \frac{1.00}{jX_{s,max}} \quad (5-9)$$

สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (5-10)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && P_{loss} = I^2 R \\ &\text{subject to} && E_{s,min} \leq E_s \leq E_{s,max} \quad \text{p.u.} \\ &&& X_{s,min} \leq X_s \leq X_{s,max} \quad \Omega \end{aligned} \quad (5-10)$$

โดยที่ E_s คือ แรงดันของ D-STATCOM
 X_s คือ รีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM

การค้นหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยสามารถทำได้โดยการหาค่าเหมาะที่สุด ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหนดโดยใช้ฟังก์ชันค่าเหมาะที่สุด คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ตัวแปรที่สำคัญและค่าของตัวแปรที่เลือกใช้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

ตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมใน MATLAB	ค่าของตัวแปรจินเนติกอัลกอริทึมที่เลือกใช้
PopulationType	double Vector
PopulationSize	100
CrossoverFraction	0.8
Generations	100
StallGenLimit	100
StallTimeLimit	inf
CrossoverFcn	crossoverscattered
MutationFcn	mutationgaussian

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ระบบทดสอบ 15 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหนด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหนดปกติ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

ในระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหนดปกติ

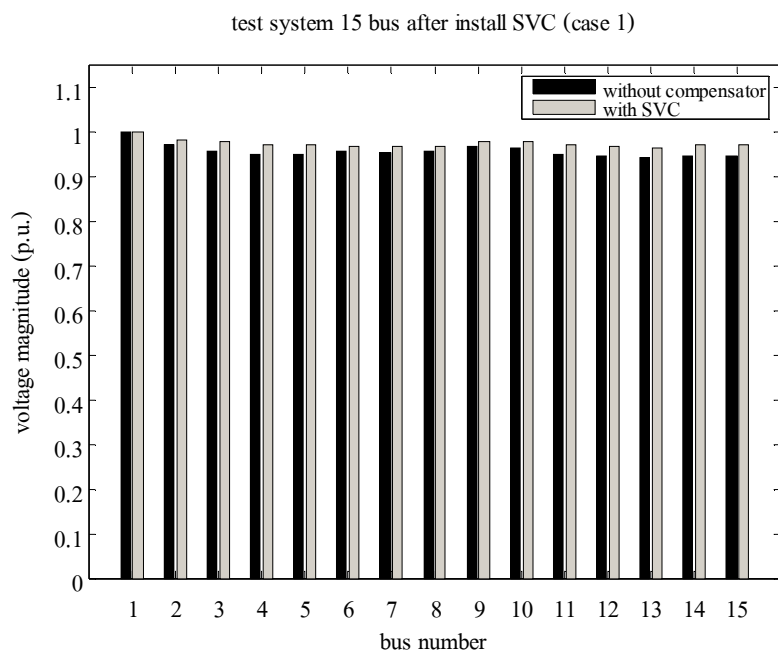
SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$ E_s $ (p.u.)	X_s (Ω)
3	0.00	10.8569	3 – 4	0.0872	1.0323	3.6768

จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 15 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.3 ในสภาวะโหนดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 13

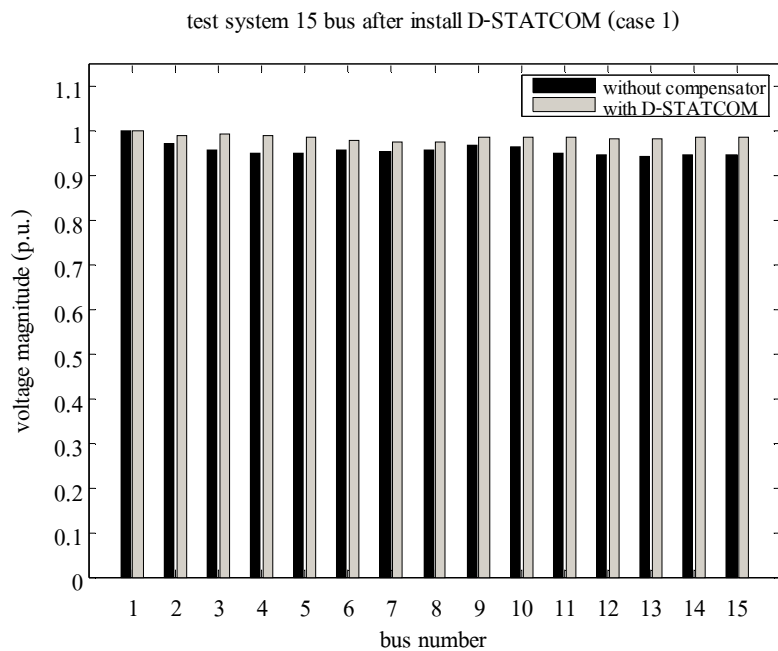
ขนาด 0.94452 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 6 บัส กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 61.7944 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 3 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 10.8569 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.3 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.96713 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 37.0911 kW เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 3 และบัสที่ 4 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 3 เป็นระยะ 0.0872 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 และบัสที่ 4 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0323 p.u. และ X_s เท่ากับ 3.6768 Ω ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.3 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.98229 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 21.2508 kW ขนาดแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยด้วย SVC และ D-STATCOM สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งดังในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลดปกติ
เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
3	0.95667	0.97899	0.99397
4	0.95090	0.97336	0.98948
5	0.94992	0.97240	0.98853
7	0.95601	0.96818	0.97642
8	0.95695	0.96912	0.97734
11	0.94995	0.97243	0.98751
12	0.94583	0.96841	0.98355
13	0.94452	0.96713	0.98229
14	0.94861	0.97112	0.98727
15	0.94844	0.97096	0.98711
กำลังงานสูญเสียทั้งหมด (kW)	61.7944	37.0911	21.2508



รูปที่ 5.3 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง SVC



รูปที่ 5.4 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM

การค้นหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

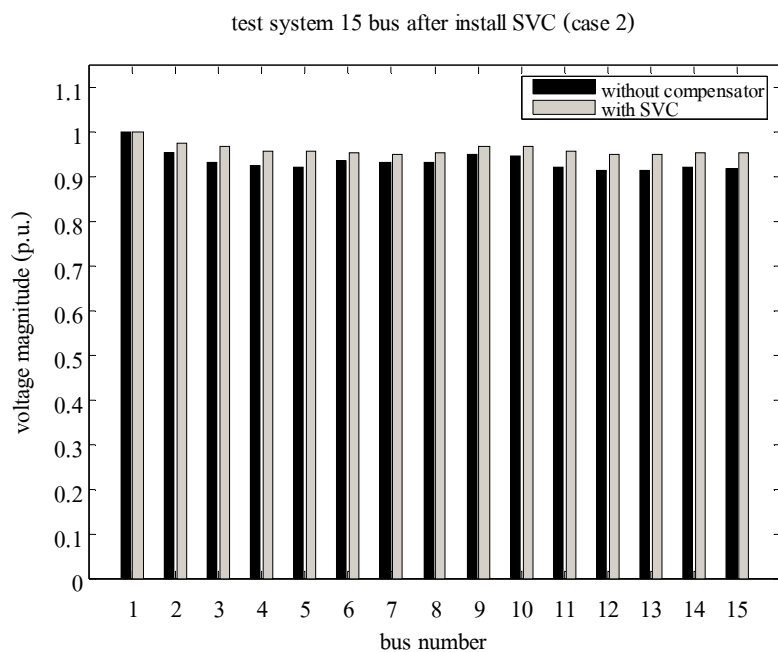
ในระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ

SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$ E_s $ (p.u.)	X_s (Ω)
3	0.00	16.9180	3 – 4	0.0741	1.0499	3.6875

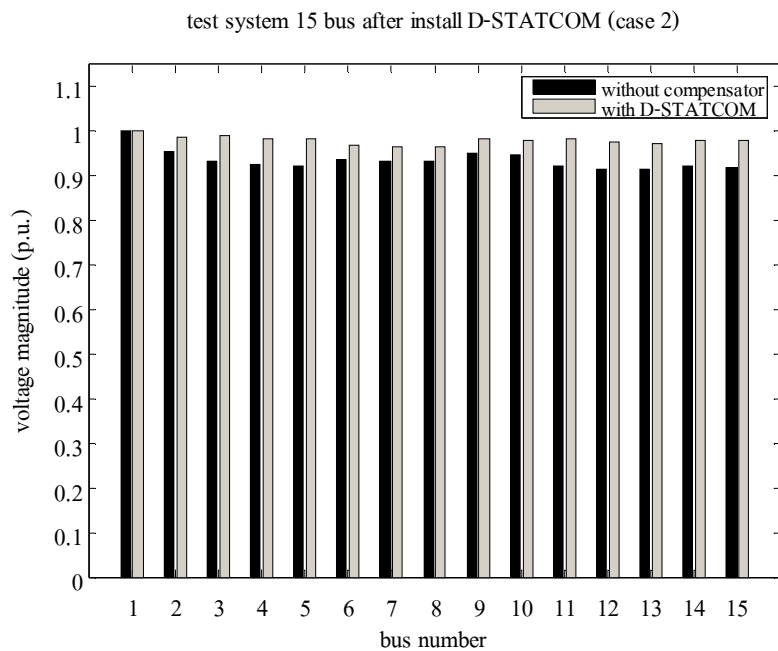
จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 15 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.5 ในสภาวะโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 13 ขนาด 0.91440 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 12 บัส บัสที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.95 p.u. ได้แก่ บัสที่ 1, 2 และบัสที่ 3 กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 146.751 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 3 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 16.918 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.5 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.95012 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 86.3116 kW โดยคิดเป็นร้อยละ 41.2 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 3 และบัสที่ 4 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 3 เป็นระยะ 0.0741 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 และบัสที่ 4 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0499 p.u. และ X_s เท่ากับ 3.6875 Ω โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.5 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.97372 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 48.5192 kW คิดเป็นร้อยละ 66.9 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด ขนาดแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยด้วย SVC และ D-STATCOM สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่า
ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ (1.5 เท่าโหลด)	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
2	0.95577	0.97458	0.98719
3	0.93320	0.96822	0.99139
4	0.92430	0.95965	0.98439
5	0.92277	0.95818	0.98296
6	0.93571	0.95492	0.96779
7	0.93229	0.95157	0.96449
8	0.93374	0.95300	0.96589
9	0.95071	0.96962	0.98229
10	0.94907	0.96801	0.98070
11	0.92281	0.95822	0.98163
12	0.91643	0.95208	0.97563
13	0.91440	0.95012	0.97372
14	0.92075	0.95623	0.98106
15	0.92049	0.95598	0.98081
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมด (kW)	146.7510	86.3116	48.5192



รูปที่ 5.5 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง SVC



รูปที่ 5.6 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM

การค้นหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

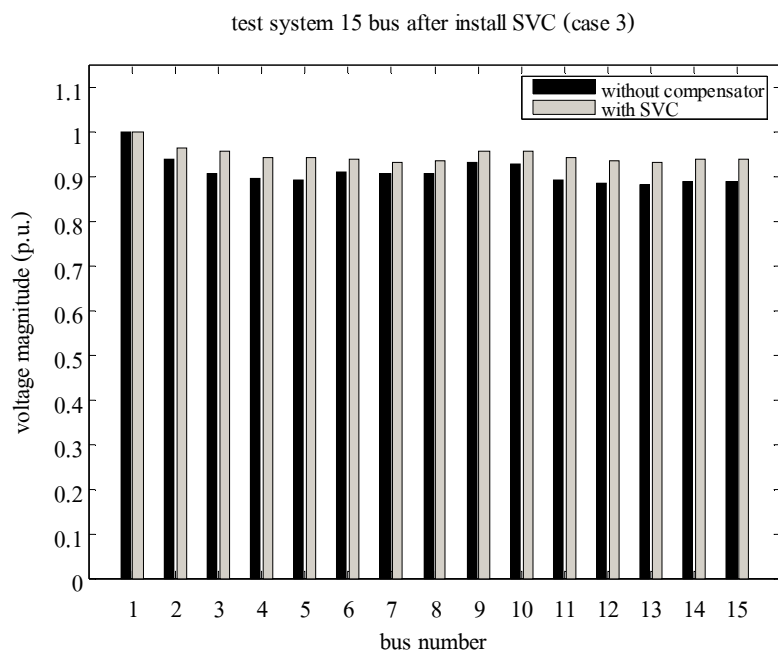
ในระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ

SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$ E_s $ (p.u.)	X_s (Ω)
3	0.00	23.4762	2 – 3	0.8128	1.0500	2.9736

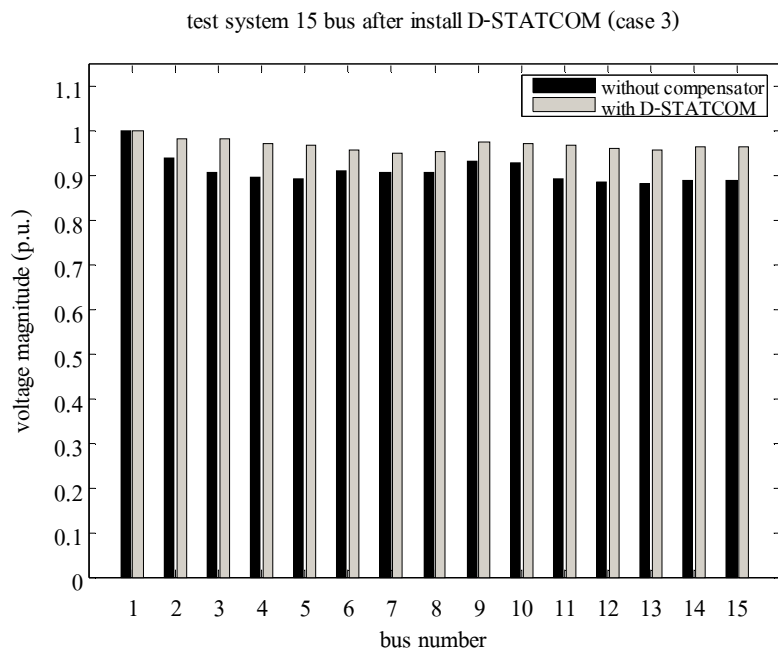
จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 15 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.7 ในสภาวะโหลด 2 เท่าของโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 13 ขนาด 0.88227 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 14 บัส ตั้งแต่บัสที่ 2 ถึงบัสที่ 15 กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 276.7919 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 3 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 23.476 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.7 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.93271 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่า 0.95 p.u. มีจำนวน 10 บัส และบัสที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการชดเชยมากกว่า 0.95 p.u. คือ บัสที่ 1, 2, 9, 3 และบัสที่ 10 และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 158.9807 kW โดยคิดเป็นร้อยละ 42.6 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 2 เป็นระยะ 0.8128 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0500 p.u. และ X_s เท่ากับ 2.9736 Ω โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.7 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.95846 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 91.117 kW คิดเป็นร้อยละ 67.1 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด ขนาดแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยด้วย SVC และ D-STATCOM สามารถแสดงในรูปแบบแผนภูมิแท่งดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 แรงดันบั๊สและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 15 บั๊ส กรณีโหลด 2 เท่า
ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บั๊ส	ขนาดแรงดันบั๊ส (p.u.)		
	ระบบปกติ (2 เท่าโหลด)	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
2	0.93930	0.96567	0.98296
3	0.90822	0.95726	0.98236
4	0.89596	0.94565	0.97106
5	0.89387	0.94367	0.96912
6	0.91182	0.93899	0.95678
7	0.90713	0.93444	0.95232
8	0.90913	0.93638	0.95422
9	0.93242	0.95898	0.97639
10	0.93019	0.95681	0.97426
11	0.89390	0.94371	0.96916
12	0.88508	0.93536	0.96104
13	0.88227	0.93271	0.95846
14	0.89107	0.94102	0.96655
15	0.89071	0.94068	0.96622
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมด (kW)	276.7919	158.9807	91.1166



รูปที่ 5.7 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง SVC



รูปที่ 5.8 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 15 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ระบบทดสอบ 34 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสีย น้อยที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่วงโอนโหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลดปกติ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

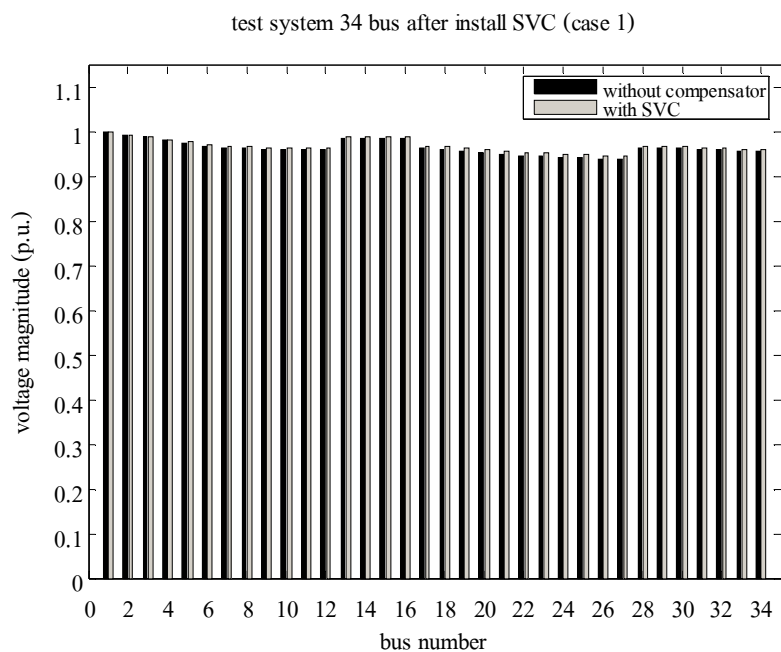
ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ

SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$ E_s $ (p.u.)	X_s (Ω)
21	0.00	19.5113	21 – 22	0.8864	1.0299	2.0000

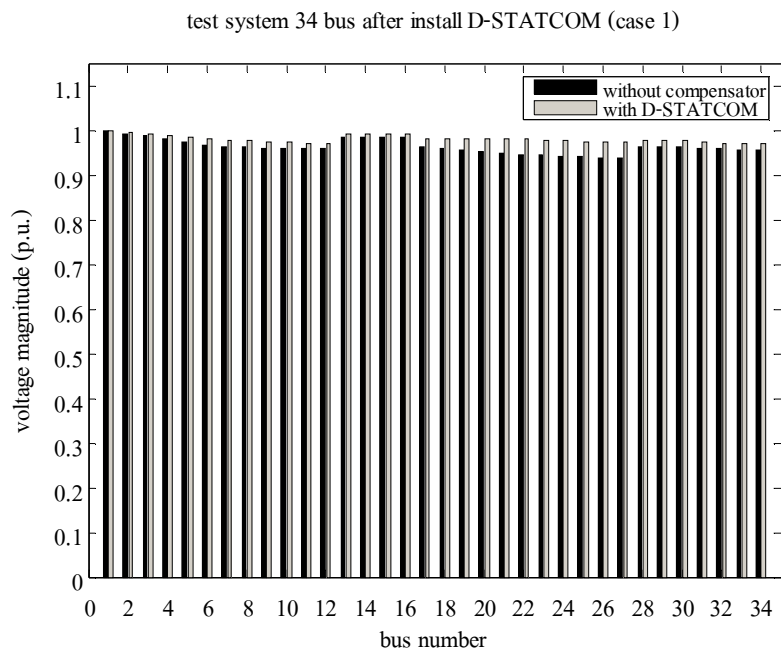
จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 34 บัส จะได้ผล เหนยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.9 ในสภาวะโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 27 ขนาด 0.94169 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 6 บัส กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 221.7235 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่บัส 21 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 19.5113 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.9 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.94896 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่า 0.95 p.u. มีจำนวน 3 บัส ได้แก่บัสที่ 25, 26 และบัสที่ 27 และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 173.3875 kW โดยคิดเป็นร้อยละ 21.8 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 21 เป็นระยะ 0.8864 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0299 p.u. และ X_s เท่ากับ 2.0000 Ω โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.9 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.97644 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 96.4013 kW คิดเป็นร้อยละ 56.5 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด ขนาดแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยด้วย SVC และ D-STATCOM สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.9 แรงดันบั๊ตและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บั๊ต กรณีโหลดปกติ
เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บั๊ต	ขนาดแรงดันบั๊ต (p.u.)		
	ระบบปกติ	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
7	0.96659	0.97015	0.98048
8	0.96448	0.96805	0.97841
9	0.96202	0.96559	0.97598
10	0.96083	0.96441	0.97481
11	0.96037	0.96396	0.97436
12	0.96023	0.96382	0.97422
17	0.96595	0.97029	0.98319
18	0.96224	0.96731	0.98258
19	0.95815	0.96397	0.98217
20	0.95486	0.96136	0.98221
21	0.95199	0.95918	0.98269
22	0.94872	0.95594	0.98322
23	0.94604	0.95327	0.98063
24	0.94351	0.95077	0.97820
25	0.94230	0.94956	0.97702
26	0.94183	0.94910	0.97657
27	0.94169	0.94896	0.97644
28	0.96625	0.96981	0.98015
29	0.96603	0.96959	0.97993
30	0.96591	0.96948	0.97982
31	0.96049	0.96407	0.97447
32	0.96015	0.96373	0.97414
33	0.95998	0.96356	0.97397
34	0.95992	0.96351	0.97391
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมด (kW)	221.7235	173.3875	96.4013



รูปที่ 5.9 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง SVC



รูปที่ 5.10 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM

การค้นหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

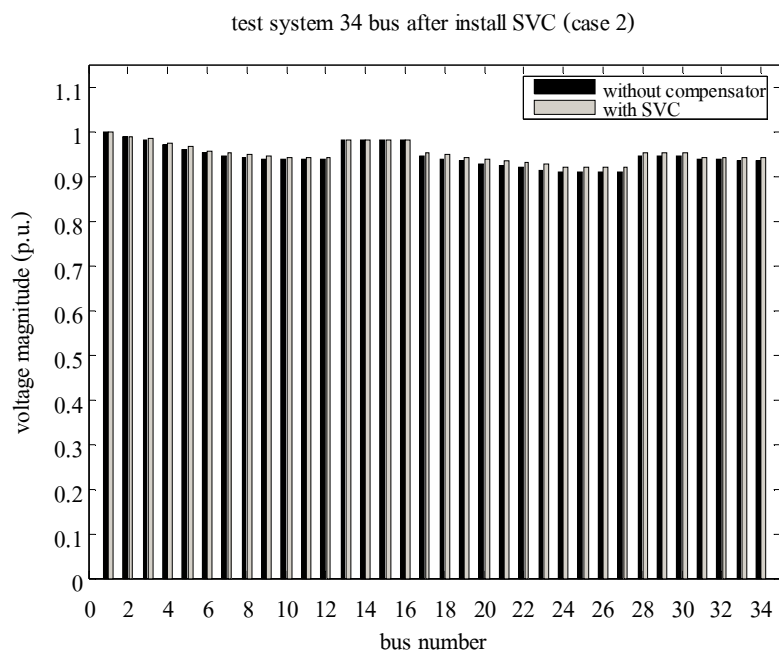
ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ

SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$ E_s $ (p.u.)	X_s (Ω)
21	0.00	30.6998	21 – 22	0.8813	1.0473	2.0000

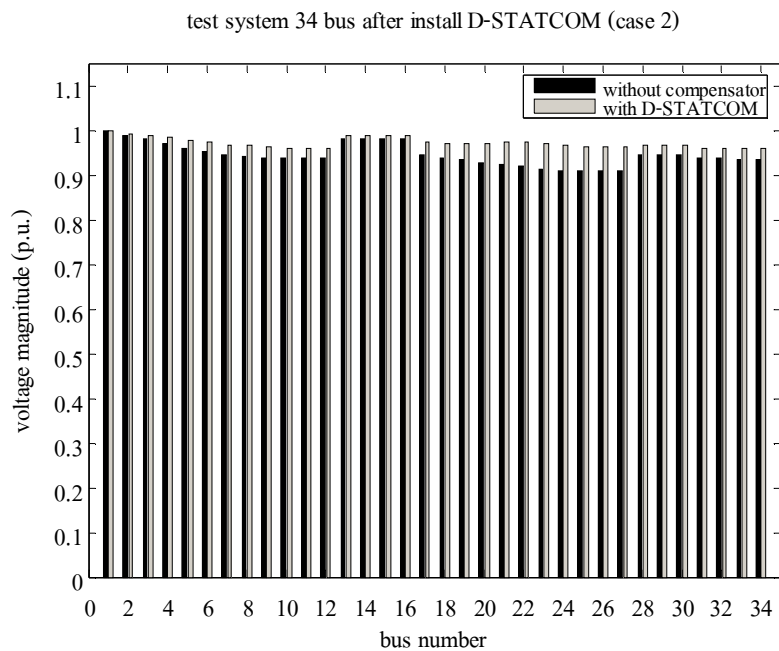
จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 34 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.11 ในสถานะโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 27 ขนาด 0.90999 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 24 บัส กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 525.3673 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 21 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 30.6998 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.11 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นโดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.92148 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่า 0.95 p.u. มีจำนวน 18 บัส และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 408.8198 kW โดยคิดเป็นร้อยละ 22.2 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 21 เป็นระยะ 0.8813 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0473 p.u. และ X_s เท่ากับ 2.0000 Ω โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.11 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.96532 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 220.5497 kW คิดเป็นร้อยละ 58.0 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด ขนาดแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยด้วย SVC และ D-STATCOM สามารถแสดงในรูปแบบภูมิเวกเตอร์รูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.11 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่า
ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ (1.5 เท่าโหลด)	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
8	0.94538	0.95102	0.96762
9	0.94160	0.94726	0.96392
10	0.93978	0.94545	0.96214
11	0.93907	0.94475	0.96146
12	0.93887	0.94454	0.96125
17	0.94758	0.95441	0.97498
18	0.94185	0.94981	0.97416
19	0.93551	0.94465	0.97365
20	0.93041	0.94063	0.97384
21	0.92598	0.93726	0.97467
22	0.92091	0.93226	0.97561
23	0.91674	0.92814	0.97168
24	0.91282	0.92427	0.96798
25	0.91094	0.92241	0.96621
26	0.91021	0.92170	0.96552
27	0.90999	0.92148	0.96532
28	0.94809	0.95371	0.97026
29	0.94775	0.95337	0.96993
30	0.94758	0.95320	0.96976
31	0.93925	0.94493	0.96163
32	0.93873	0.94441	0.96112
33	0.93847	0.94415	0.96086
34	0.93838	0.94406	0.96078
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมด (kW)	525.3673	408.8198	220.5497



รูปที่ 5.11 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง SVC



รูปที่ 5.12 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM

การค้นหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด จากการหาค่าเหมาะที่สุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

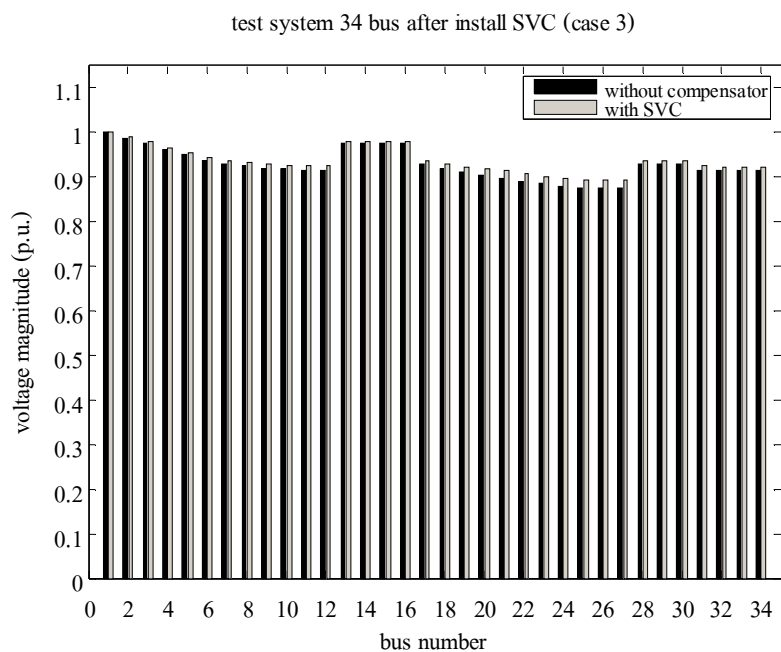
ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ

SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$ E_s $ (p.u.)	X_s (Ω)
21	0.00	43.1000	22 – 23	0.4011	1.0488	2.0977

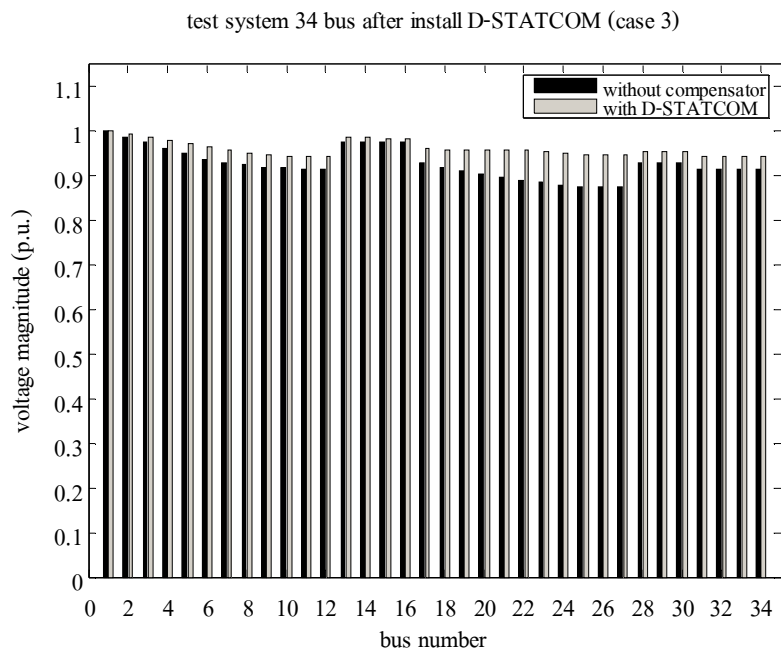
จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 34 บัส จะได้ผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.13 ในสภาวะโหลด 2 เท่าของโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 27 ขนาด 0.87615 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 26 บัส และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 988.5787 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 21 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 43.1000 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.13 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.89239 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่า 0.95 p.u. มีจำนวน 25 บัส และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 764.6446 kW โดยคิดเป็นร้อยละ 22.7 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 22 และบัสที่ 23 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 22 เป็นระยะ 0.4011 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 22 และบัสที่ 23 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0488 p.u. และ X_s เท่ากับ 2.0977 Ω โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.13 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.94775 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่า 0.95 p.u. มีจำนวน 11 บัส และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 406.6321 kW คิดเป็นร้อยละ 58.9 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด ขนาดแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยด้วย SVC และ D-STATCOM สามารถแสดงในรูปแผนภูมิแท่งดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.13 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่า
ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ (2 เท่าโหลด)	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
8	0.92517	0.93313	0.95249
9	0.92000	0.92800	0.94747
10	0.91751	0.92554	0.94505
11	0.91655	0.92459	0.94412
12	0.91627	0.92430	0.94385
17	0.92810	0.93768	0.96158
18	0.92019	0.93136	0.95963
19	0.91144	0.92428	0.95794
20	0.90440	0.91874	0.95729
21	0.89827	0.91411	0.95751
22	0.89125	0.90722	0.95865
23	0.88549	0.90156	0.95639
24	0.88006	0.89624	0.95137
25	0.87745	0.89367	0.94896
26	0.87645	0.89269	0.94803
27	0.87615	0.89239	0.94775
28	0.92888	0.93680	0.95609
29	0.92841	0.93634	0.95563
30	0.92818	0.93611	0.95541
31	0.91680	0.92483	0.94436
32	0.91608	0.92412	0.94367
33	0.91573	0.92377	0.94332
34	0.91561	0.92365	0.94321
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมด (kW)	988.5787	764.6446	406.6321



รูปที่ 5.13 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง SVC



รูปที่ 5.14 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 2 เท่าของโหลดปกติ และติดตั้ง D-STATCOM

5.5 สรุป

จุดประสงค์หลักของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM เข้าในระบบไฟฟ้าก็เพื่อช่วยป้องกันกลุ่มโหลดจากความผิดปกติต่าง ๆ รวมถึงแรงดันตกในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้เหมือนหรือใกล้เคียงกับสภาวะปกติมากที่สุด เนื้อหาบทนี้เป็นการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุดในกรณีที่ระบบจ่ายโหลดปกติและกรณีจ่ายโหลดหนัก ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จากผลการทดสอบพบว่า ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่ได้จากการค้นหาทำให้แรงดันไฟฟ้าโดยรวมของระบบสูงขึ้น กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าลดลง

บทที่ 6

การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV

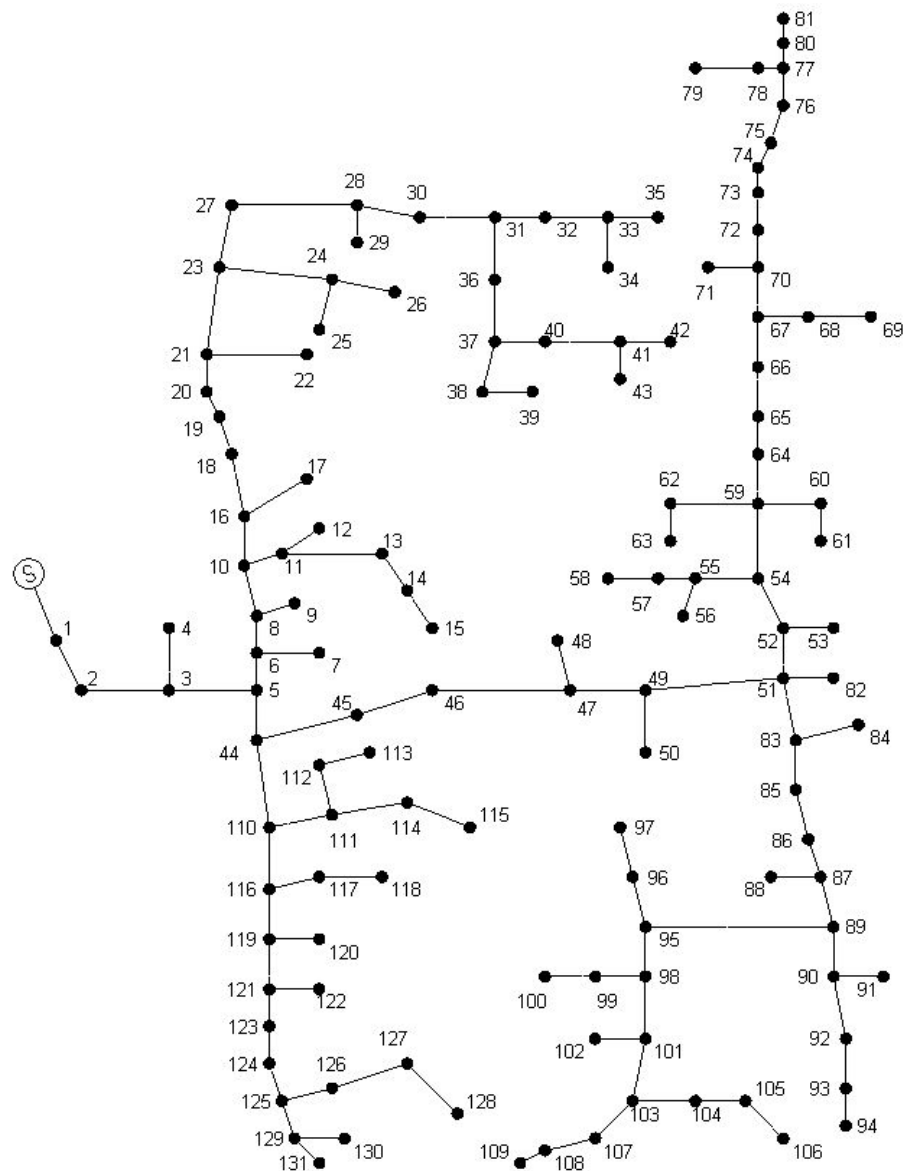
6.1 บทนำ

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุถือเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและมีราคาถูกกว่าอุปกรณ์ชดเชยประเภทอื่น ๆ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสต่าง ๆ กระจายไปตามสายจ่ายไฟฟ้า ตำแหน่งในการติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ไม่เหมาะสมย่อมไม่ทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้นอย่างที่ต้องการจะเป็น ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งที่เหมาะสมถือเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องได้รับการพิจารณาอย่างรอบคอบ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเลือกระบบทดสอบของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 (วงจร 10) จำนวน 131 บัส เพื่อเป็นกรณีศึกษา วัตถุประสงค์หลักในการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม คือ การลดกำลังงานสูญเสียในระบบให้ได้มากที่สุดและใช้ตำแหน่งติดตั้งไม่มากเกินไปเพื่อให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา

6.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV นครราชสีมา 2 (วงจร 10)

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา 2 เป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 22 kV มีวงจรย่อยทั้งสิ้น 12 วงจร งานวิจัยนี้เลือกเอาวงจรย่อยที่ 10 เพียงวงจรเดียวเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา โดยวงจรย่อยที่ 10 เริ่มจ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 เดินสายไปทางทิศตะวันออกผ่านถนนมิตรภาพรวมระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร ลากสายไฟทางทิศใต้เข้าสู่การเคหะ จากนั้นสายจ่ายจะแยกออกเป็น 2 ทาง ทางที่หนึ่งลากสายไปทางทิศใต้และสิ้นสุดที่กองบิน 1 ทางที่สองลากสายไปทางทิศตะวันออกตามถนนสีสุริและซอยรางน้ำ จนกระทั่งสิ้นสุดที่ถนนพิบูลสงคราม วงจรนี้มีบัสทั้งสิ้น 131 บัส มีโหลดทั้งสิ้น 57 โหลด รวมทั้งสิ้น 3479.592 kW และ 1925.211 kVar ข้อมูลของระบบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) แสดงได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV นครราชสีมา 2 (วงจร 10)

6.3 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV

การค้นหาลำดับตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ทำได้โดยการพิจารณาจากค่าตัวประกอบกำลังงานสูญเสีย (*LSF*) และดัชนีกำลังงานสูญเสีย (*PLI*) ดังตัวอย่างที่แสดงไปแล้วในบทที่ 4 ส่วนการหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ ทำได้โดยการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมโดยมีวัตถุประสงค์ คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และการเลือกตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เทคนิคการถ่ายทอดร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม ดังนี้

6.3.1 การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ

ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสม สามารถพิจารณาได้จากดัชนี LSF และ PLI ดังนี้ สำหรับดัชนี LSF บัสที่มีค่า LSF สูงที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกและบัสที่มีค่า LSF น้อยที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับสุดท้าย นอกจากนี้จะต้องพิจารณาขนาดของแรงดันที่บัสนั้นควบคุมกันไปด้วยโดยการหาค่านอร์มของ $V[i]$ สามารถหาได้จาก $V[i]/0.95$ สำหรับกรณีของวงจร 10 แรงดันที่ส่งจากสถานีไฟฟ้ามีค่า 1.02 p.u. ดังนั้นหลักเกณฑ์ในการเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุจึงแตกต่างจากบทที่ 4 เล็กน้อย แต่หลักการในการเลือกยังคงคล้ายกัน คือ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งไวต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังงานสูญเสียและมีระดับแรงดันที่ต่ำกว่าบัสอื่น ๆ ดังนั้น ถ้าบัสใดมีค่านอร์มของ $V[i]$ มากกว่า 1.055 บัสนั้นจะไม่ได้รับการเลือกให้เป็นตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ถึงแม้ค่าดัชนี LSF จะมีค่ามากที่สุดก็ตาม และบัสที่มีค่าดัชนี LSF รองลงมาจะได้รับการพิจารณา ดังนั้นบัสที่ถูกเลือกเป็นตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุจะต้องมีค่า LSF สูงและมีค่านอร์มของ $V[i]$ น้อยกว่า 1.055 ทั้งนี้ค่านอร์มของ $V[i]$ อาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคในการเลือกของแต่ละคน สำหรับดัชนี PLI บัสที่มีค่า PLI สูงที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกและบัสที่มีค่า PLI น้อยที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับสุดท้ายในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ

6.3.2 การหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ

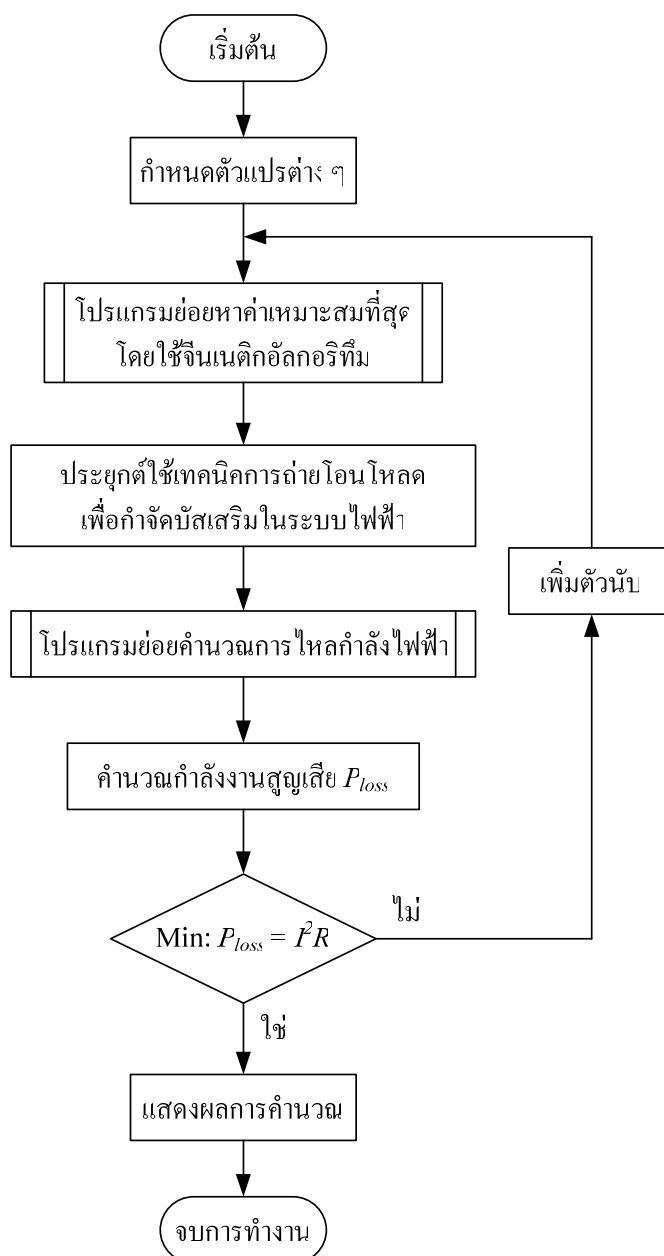
ขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุหาได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยกำหนดฟังก์ชันกัณฑ์วัตถุประสงค์เป็น กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตขนาดของตัวเก็บประจุ สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (6-1)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & P_{loss} = I^2 R \\ \text{subject to} \quad & Q_{c,i}^{min} \leq Q_{c,i} \leq Q_{c,i}^{max} \quad \text{kVar} \end{aligned} \quad (6-1)$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบ

สำหรับการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่วงโอนโหลด จะดำเนินการไปพร้อม ๆ กัน โดยการเลือกตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยพิจารณาจากค่ากำลังงานสูญเสียรวมทั้งหมดของระบบ ถ้าตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เลือกทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าต่ำที่สุด ตำแหน่งและขนาดดังกล่าวจะ

เป็นจุดคำตอบของปัญหา สำหรับกรณีศึกษา (วงจร 10) ในการจำลองผลเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ กำหนดเงื่อนไขขนาดของตัวเก็บประจุแต่ละตำแหน่งติดตั้งไว้ที่ค่าต่ำสุดและสูงสุดคือ 100 kVar และ 1200 kVar ตามลำดับ แผนภาพการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แผนภาพการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด

6.4 ผลการทดสอบ

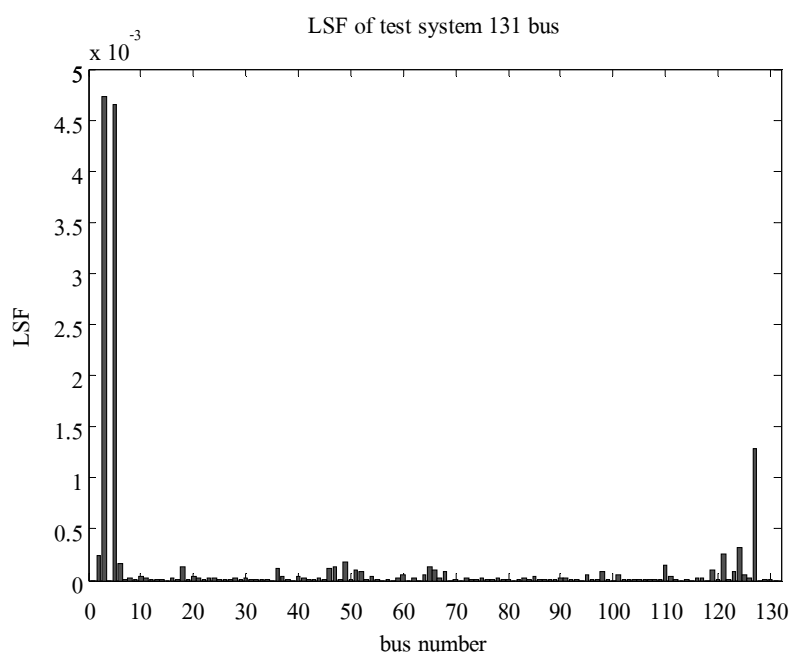
การทดสอบในบทนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการค้นหาตำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *LSF* ส่วนที่ 2 เป็นการค้นหาตำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *PLI* โดยตำแหน่งที่ได้จากดัชนีทั้ง 2 ตัว ไม่จำเป็นต้องเป็นตำแหน่งเดียวกัน และส่วนที่ 3 เป็นการค้นหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งที่เลือกจากดัชนีทั้ง 2 ตัว เปรียบเทียบกับการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด

ส่วนที่ 1 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *LSF*

ดัชนี *LSF* ของระบบทดสอบ 131 บัส แสดงในตารางที่ 6.1 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า *LSF* สูงที่สุด 28 อันดับแรก จากตารางที่ 6.1 บัสที่ 3 มีค่า *LSF* มากที่สุดจึงได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นบัสแรก แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่ามากกว่า 1.055 ดังนั้น บัสที่ 3 จะไม่ได้รับการเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า *LSF* เป็นลำดับที่ 2 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 5 พบว่ามีค่ามากกว่า 1.055 ดังนั้น บัสที่ 5 จะไม่ได้รับการพิจารณาเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 127 และ 124 เป็นบัสที่มีค่า *LSF* สูงเป็นลำดับที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของแต่ละบัสพบว่ามีค่าน้อยกว่า 1.055 ดังนั้น บัสทั้งสองจะถูกเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 127 และ 124 จึงเป็นบัสที่ได้รับการจัดลำดับความสำคัญเป็นลำดับที่ 1 และ 2 ตามลำดับ บัสที่ 121, 2, 49, 6, 110 และ 47 เป็นบัสที่มีค่า *LSF* อยู่ในลำดับที่ 5-10 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่ามากกว่า 1.055 ดังนั้น บัสดังกล่าวจึงไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 65 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า *LSF* เป็นลำดับที่ 11 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 65 พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1.055 ดังนั้น บัสที่ 65 จะได้รับการพิจารณาเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 18, 36, 46, 66, 119 และ 51 เป็นบัสที่มีค่า *LSF* อยู่ในลำดับที่ 12-17 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่ามากกว่า 1.055 ดังนั้น บัสดังกล่าวจึงไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 68 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า *LSF* เป็นลำดับที่ 18 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 68 พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1.055 ดังนั้น บัสที่ 68 จะได้รับการพิจารณาเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 52, 123, 98 และ 95 เป็นบัสที่มีค่า *LSF* อยู่ในลำดับที่ 19-22 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่ามากกว่า 1.055 ดังนั้น บัสดังกล่าวจึงไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ สำหรับระบบทดสอบ 131 บัส เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุจำนวน 6 บัส เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า *LSF* สูงที่สุด 28 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 127, 124, 65, 66, 68 และ 125 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 131 บัส

Bus No.	$\partial P_{line\,loss} / \partial Q_{eff}$	V[i]/0.95	Basecase voltage (p.u.)
3	0.004727	1.06376	1.01057
5	0.004651	1.05673	1.00389
127	0.001281	1.05292	1.00027
124	0.000318	1.05496	1.00222
121	0.000251	1.05564	1.00286
2	0.000237	1.07320	1.01954
49	0.000172	1.05581	1.00302
6	0.000164	1.05641	1.00359
110	0.000153	1.05638	1.00356
47	0.000138	1.05615	1.00334
65	0.000133	1.05497	1.00222
18	0.000132	1.05599	1.00320
36	0.000123	1.05550	1.00272
46	0.000120	1.05642	1.00360
66	0.000106	1.05476	1.00203
119	0.000100	1.05614	1.00333
51	0.000094	1.05563	1.00285
68	0.000090	1.05460	1.00187
52	0.000088	1.05546	1.00268
123	0.000084	1.05548	1.00271
98	0.000082	1.05530	1.00253
95	0.000061	1.05540	1.00263
125	0.000060	1.05485	1.00210
64	0.000060	1.05523	1.00247
101	0.000056	1.05523	1.00246
60	0.000052	1.05528	1.00252
37	0.000046	1.05544	1.00267
85	0.000038	1.05552	1.00274



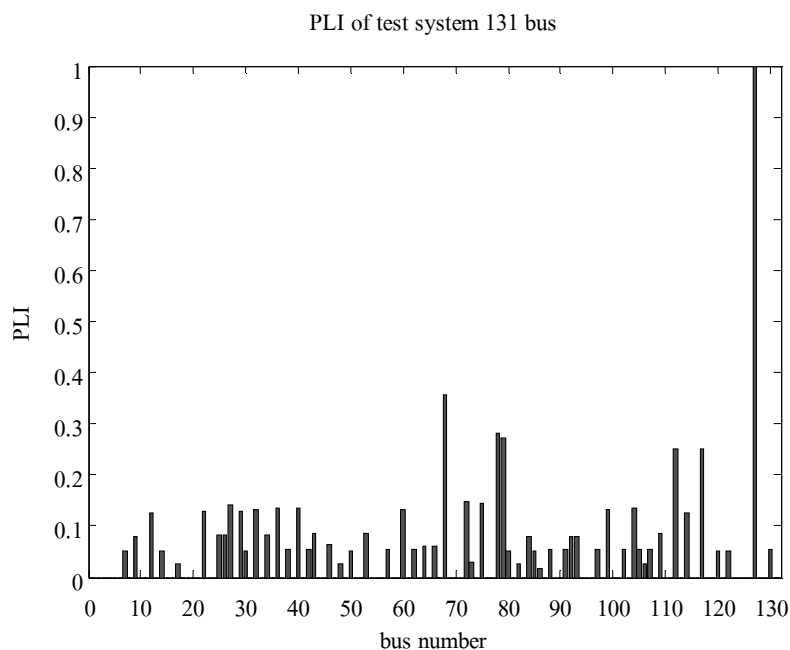
รูปที่ 6.3 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 131 บัส

ส่วนที่ 2 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี PLI

ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 131 บัส แสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า PLI สูงที่สุด 27 อันดับแรก จากตารางที่ 6.2 เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 559.35 kVar ที่บัส 127 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 5.07 kW ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ดังนั้น บัสที่ 127 จึงมีค่า PLI มากที่สุด คือ 1.00 จึงทำให้ได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับแรก ดังนั้น บัสที่ 127 จะได้รับการพิจารณาเป็นบัสแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 172.23 kVar ที่บัส 68 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 1.81 kW โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงอยู่ในลำดับที่ 2 ทำให้บัสที่ 68 มีค่า PLI เป็นลำดับที่ 2 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 2 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 132.81 kVar ที่บัส 78 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 1.43 kW ทำให้บัสที่ 78 มีค่า PLI เป็นลำดับที่ 3 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 3 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 129.43 kVar ที่บัส 79 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 1.39 kW ทำให้บัสที่ 79 มีค่า PLI เป็นลำดับที่ 4 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 4 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ สำหรับระบบทดสอบ 131 บัส เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุจำนวน 6 บัส เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 27 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 127, 68, 78, 79, 117 และ 112 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.2 คำนวณ *PLI* ของระบบทดสอบ 131 บัส

Bus No.	Power loss after compensation (kW)	Loss reduction (kW)	Power loss index (<i>PLI</i>)	Capacitor size (kVar)
127	38.7566	5.0725	1.0000	559.3548
68	42.0154	1.8137	0.3576	172.2339
78	42.4041	1.4250	0.2809	132.8082
79	42.4386	1.3905	0.2741	129.4269
117	42.5504	1.2787	0.2521	129.0362
112	42.5517	1.2774	0.2518	129.0298
72	43.0815	0.7476	0.1474	68.5562
75	43.0903	0.7388	0.1457	67.5473
27	43.1148	0.7143	0.1408	69.1770
36	43.1382	0.6909	0.1362	65.8191
104	43.1419	0.6872	0.1355	64.2922
40	43.1469	0.6822	0.1345	64.6431
99	43.1504	0.6787	0.1338	63.7785
60	43.1531	0.6760	0.1333	63.7822
32	43.1599	0.6692	0.1319	64.2867
29	43.1680	0.6611	0.1303	63.7354
22	43.1722	0.6569	0.1295	63.7208
12	43.1853	0.6438	0.1269	63.6762
114	43.1867	0.6424	0.1267	63.6690
109	43.3910	0.4381	0.0864	40.6298
43	43.3960	0.4331	0.0854	40.6167
53	43.3984	0.4307	0.0849	40.6169
34	43.4031	0.4260	0.0840	40.6043
26	43.4058	0.4233	0.0834	40.5945
25	43.4058	0.4233	0.0834	40.5945
9	43.4183	0.4108	0.0810	40.5532
92	43.4217	0.4074	0.0803	38.3632



รูปที่ 6.4 คัดชนี *PLI* ของระบบทดสอบ 131 บัส

ส่วนที่ 3 การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

ระบบทดสอบ 131 บัส เป็นระบบทดสอบ 22 kV 100 kVA การค้นหาขนาดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวเก็บประจุ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 6.3 เมื่อใช้ดัชนี *LSF* เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่า บัสที่ 127, 124, 65, 66, 68 และ 125 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาด 323, 149.25, 796, 211, 139 และ 207 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 1825.25 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 127, 68, 78, 79, 117 และ 112 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 355, 257, 165, 252, 409 และ 476 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 1914.00 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่าตัวเก็บประจุจะต้องติดตั้งระหว่างบัสที่ 6 กับ 7 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 6 เป็นระยะ 0.29 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 6 และ 7 ติดตั้งที่บัส 67 และ 127 ติดตั้งระหว่างบัสที่ 101 กับ 103 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 101 เป็นระยะ 0.57 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 101 และ 103 ติดตั้งระหว่างบัสที่ 3 กับ 4 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 3 เป็นระยะ 0.82 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 และ 4 และติดตั้งระหว่างบัสที่ 31 กับ 36 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 31 เป็นระยะ 0.67 เท่าของความ

ยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 31 และ 36 โดยขนาดของตัวเก็บประจุ คือ 500, 546, 356, 236, 100 และ 276 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2014.00 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชยแสดงในตารางที่ 6.4 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 15 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 6.4 พบว่าแรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 127 คือ 1.00027 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่าบัสที่ 127 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 1.00936 p.u. ขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้น เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าบัสที่ 127 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 1.00931 p.u. แรงดันบัสหลังการชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดพบว่าบัสที่ 127 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 1.00931 p.u. เมื่อพิจารณาในภาพรวม ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากตารางที่ 6.5 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 6 ตำแหน่ง แต่วิธี *LSF* และ *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LTT* ขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 131 บัสทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 6.5 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 43.8291 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี *LTT* มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 33.1028 kW วิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 33.3653 kW และวิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 33.6088 kW

ตารางที่ 6.3 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 131 บัส

สภาวะโหลดปกติ

<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		<i>LTT</i>		
Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	α	Capacitor size (kVar)
127	323.00	127	355.00	6 – 7	0.29	500.00
124	149.25	68	257.00	67	0.00	546.00
65	796.00	78	165.00	127	0.00	356.00
66	211.00	79	252.00	101 – 103	0.57	236.00
68	139.00	117	409.00	3 – 4	0.82	100.00
125	207.00	112	476.00	31 – 36	0.67	276.00
Total	1825.25	Total	1914.00	Total		2014.00

ตารางที่ 6.4 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 131 บัส

สถานะโหลดปกติ

Before compensation		After compensation (LSF)		After compensation (PLI)		After compensation (LTT)	
Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)
127	1.00027	127	1.00936	127	1.00931	127	1.00931
128	1.00027	128	1.00936	128	1.00931	128	1.00931
79	1.00178	42	1.00950	42	1.00984	79	1.01036
78	1.00179	43	1.00951	43	1.00985	78	1.01036
80	1.00181	41	1.00951	41	1.00985	80	1.01038
81	1.00181	40	1.00953	40	1.00987	81	1.01038
77	1.00181	38	1.00957	38	1.00990	77	1.01039
76	1.00184	39	1.00957	39	1.00990	126	1.01039
75	1.00186	37	1.00957	37	1.00991	130	1.01040
69	1.00187	36	1.00963	36	1.00996	129	1.01040
68	1.00187	34	1.00976	34	1.01009	131	1.01040
74	1.00190	33	1.00976	33	1.01009	125	1.01041
73	1.00190	35	1.00976	35	1.01009	76	1.01041
72	1.00193	32	1.00976	32	1.01010	75	1.01044
70	1.00198	31	1.00977	106	1.01011	68	1.01044

ตารางที่ 6.5 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 131 บัส

สถานะโหลดปกติ

Characteristics/Methods	<i>LSF</i>	<i>PLI</i>	LTT
No. of selected locations	6	6	6
Total compensation (kVar)	1825.25	1914.00	2014.00
Losses before compensation (kW)	43.8291	43.8291	43.8291
Losses after compensation (kW)	33.6088	33.3653	33.1028
Reduction of losses after compensation	23.32%	23.86%	24.47%

จำลองสถานการณ์ในกรณีที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากสภาวะโหลดปกติ โดยตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุยังคงเป็นตำแหน่งเดิม จากนั้นหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมซึ่งทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด โดยที่ขนาดของตัวเก็บประจุแต่ละตำแหน่งต้องมีค่ามากกว่า 100 kVar แต่ไม่เกิน 1200 kVar ขนาดตัวเก็บประจุแต่ละตำแหน่งของแต่ละวิธีแสดงในตารางที่ 6.6 กรณีโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ขนาดของตัวเก็บประจุที่ต้องใช้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเช่นกัน วิธี LTT ใช้ขนาดตัวเก็บประจุมากที่สุด 4178.25 kVar วิธี *PLI* ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3759 kVar และวิธี *LSF* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุน้อยที่สุด 3934.50 kVar แรงดันบัสก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดเพิ่มขึ้น 2 เท่าแสดงในตารางที่ 6.7 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 15 ลำดับแรกเท่านั้น แรงดันก่อนการชดเชยมีค่าต่ำสุดเป็น 0.97969 p.u. ที่บัส 127 และ 128 แรงดันหลังการชดเชยด้วยวิธี *LSF* บัสที่ 127 และ 128 มีแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.99869 p.u. แรงดันหลังการชดเชยด้วยวิธี *PLI* บัสที่ 127 และ 128 มีแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.99861 p.u. แรงดันหลังการชดเชยด้วยวิธี LTT บัสที่ 127 และ 128 มีแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.99867 p.u. เมื่อพิจารณาโดยรวม การชดเชยด้วยวิธี LTT ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธีอื่น กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 131 บัส กรณีโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 6.8 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 181.9963 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี LTT มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 135.0034 kW วิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 136.1826 kW และวิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 137.2970 kW

ตารางที่ 6.6 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 131 บัส

สภาวะโหลด 2 เท่าของโหลดในสภาวะปกติ

<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		LTT		
Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	α	Capacitor size (kVar)
127	644.00	127	708.00	6 – 7	0.29	990.25
124	679.50	68	509.50	67	0.00	1080.00
65	1200.00	78	764.00	127	0.00	724.00
66	849.50	79	100.00	101 – 103	0.57	512.00
68	266.00	117	904.00	3 – 4	0.82	308.00
125	100.00	112	949.00	31 – 36	0.67	564.00
Total	3759.00	Total	3934.50	Total		4178.25

ตารางที่ 6.7 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 131 บัส

สภาวะโหลด 2 เท่าของโหลดในสภาวะปกติ

Before compensation		After compensation (LSF)		After compensation (PLI)		After compensation (LTT)	
Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)	Bus no.	$ V $ (p.u.)
127	0.97969	127	0.99869	127	0.99861	127	0.99867
128	0.97969	128	0.99869	128	0.99861	128	0.99867
79	0.98280	42	0.99891	42	0.99966	79	1.00075
78	0.98280	43	0.99893	43	0.99968	78	1.00075
80	0.98285	41	0.99893	41	0.99968	80	1.00080
81	0.98285	40	0.99897	40	0.99972	81	1.00080
77	0.98285	38	0.99904	38	0.99979	77	1.00080
76	0.98290	39	0.99904	39	0.99979	126	1.00083
75	0.98296	37	0.99905	37	0.99980	76	1.00085
68	0.98297	36	0.99916	36	0.99991	130	1.00085
69	0.98297	34	0.99942	34	1.00017	129	1.00085
74	0.98302	33	0.99942	33	1.00017	131	1.00085
73	0.98304	35	0.99942	35	1.00017	125	1.00086
72	0.98309	32	0.99943	32	1.00018	75	1.00090
70	0.98319	31	0.99945	31	1.00020	68	1.00092

ตารางที่ 6.8 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 131 บัส

สภาวะโหลด 2 เท่าของโหลดในสภาวะปกติ

Characteristics/Methods	LSF	PLI	LTT
No. of selected locations	6	6	6
Total compensation (kVar)	3759.00	3934.50	4178.25
Losses before compensation (kW)	181.9963	181.9963	181.9963
Losses after compensation (kW)	137.2970	136.1826	135.0034
Reduction of losses after compensation	24.56%	25.17%	25.82%

6.5 สรุป

เนื้อหาบทนี้เป็นการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา 2 โดยเลือกวงจร 10 เพื่อเป็นกรณีศึกษา จากผลการทดสอบพบว่าแรงดันที่ส่งจากสถานีไฟฟ้าต้นทางมีค่าค่อนข้างสูงทำให้แรงดันทุกบัสในระบบมีค่าสูงด้วย กำลังงานสูญเสียของระบบในสภาวะการจ่ายโหลดปกติมีค่า 43.8291 kW เมื่อชดเชยระบบด้วยตัวเก็บประจุในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมด้วยวิธี LTT กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงมากกว่าวิธี LSF และ PLI โดยเหลือเพียง 33.1028 kW คิดเป็นร้อยละ 24.47 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อจำลองสถานการณ์ให้ความต้องการโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของโหลดในสภาวะปกติแรงดันในระบบมีค่าลดลงทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบเพิ่มขึ้นเป็น 181.9963 kW เมื่อชดเชยระบบด้วยตัวเก็บประจุในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมด้วยวิธี LTT กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงเหลือเพียง 135.0034 kW โดยคิดเป็นร้อยละ 25.82 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อถ่ายโอนโหลดในรูปแบบต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ที่บัสเสริมให้ไปอยู่ที่บัสข้างเคียงทำให้ขนาดของระบบไฟฟ้ากำลังไม่เปลี่ยนแปลงแบบจำลองโหลดที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมี 3 แบบ คือ โหลดกระแสไฟฟ้า โหลดอิมพีแดนซ์ และกำลังไฟฟ้า เทคนิคการถ่ายโอนโหลดเริ่มต้นพัฒนาจากการถ่ายโอนโหลดกระแสไฟฟ้าเป็นลำดับแรก จากนั้นจึงพัฒนาเทคนิคการถ่ายโอนโหลดอิมพีแดนซ์โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวแปรคือ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และโหลดอิมพีแดนซ์ สำหรับการพัฒนาเทคนิคการถ่ายโอนโหลดกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวแปรเช่นเดียวกัน คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และโหลดกำลังไฟฟ้า การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเรื่องอื่น ๆ เช่น การคำนวณกำลังงานสูญเสีย การพิจารณาแรงดันตก รวมถึงการวางแผนการจ่ายโหลดไปยังผู้ใช้ไฟตามสถานีต่าง ๆ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด และการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นในการจำลองผลในกรณีต่าง ๆ ภายใต้อาณาเขตการจ่ายโหลดอย่างสมดุล สำหรับการหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อลดตัวแปรที่ต้องค้นหาในระหว่างการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด การเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าอาจเลือกจากดัชนี LSF หรือดัชนี PLI ขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม วิทยานิพนธ์นี้เสนอการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จำลองผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการถ่ายโอนโหลดรูปแบบต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยนำเสนอแบบจำลองการถ่ายโอนโหลด 3 แบบ คือ โหลดกระแสไฟฟ้า โหลดอิมพีแดนซ์ และโหลดกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า โดยการถ่ายโอนโหลดที่บัสเสริมใด ๆ ไปยังบัสข้างเคียง เริ่มจากการถ่ายโอนโหลดกระแสไฟฟ้าเป็นลำดับแรก ผลจากการย้ายโหลดกระแสไฟฟ้าไปยังบัสข้างเคียง พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนไปยังบัสข้างเคียงขึ้นกับตำแหน่งของบัสเสริมในสายส่งเส้นนั้น ๆ ถ้าสมมติให้การกระจายตัวของความต้านทานในสายส่งมีความ

สมมติเสมอจากกล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการถ่ายโอนโหลดมีความสัมพันธ์กับตัวแปรค่าหนึ่ง ในวิทยานิพนธ์นี้แทนด้วยตัวแปร α มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ขึ้นกับตำแหน่งติดตั้งของโหลด จากนั้นเป็นการพัฒนาเทคนิคการถ่ายโอนโหลดอิมพีแดนซ์และโหลดกำลังไฟฟ้า ลำดับต่อมาเป็นการพัฒนาโปรแกรมคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด ประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอโดยทดสอบกับระบบทดสอบ 4 ระบบ ทดสอบ ได้แก่ ระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส และ 85 บัส โดยระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบทดสอบแบบสมมูล จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง ตำแหน่งการเพิ่มโหลดมีผลน้อยมากต่ออัตราการเข้าสู่ของผลเฉลย เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบให้มากขึ้นในตำแหน่งที่ทำให้เกิดบัลลัสเสริมพบว่าจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลงเมื่อเทียบกับวิธีเกาส์-ไซเดลมาตรฐาน เทคนิคที่นำเสนอช่วยแก้ปัญหาสภาวะเลว (ill-condition) ได้เป็นอย่างดี สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน นำเสนอการนำโหลดที่ได้จากการถ่ายโอนไปยังบัสข้างเคียงรวมกับสมการกำลังไฟฟ้าไม่สอดคล้องในส่วนของการกำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส (S_{sch}) แทนการรวมกับสมการกำลังไฟฟ้าไม่สอดคล้องในส่วนของการกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ (S_{cal}) ทำให้ขนาดของเมตริกซ์จาโคเบียนไม่เปลี่ยนแปลงช่วยลดความซับซ้อนของโปรแกรมการคำนวณ จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดพบว่า ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีนิวตัน-ราฟสันมาตรฐาน และเห็นผลชัดเจนมากขึ้นเมื่อจำนวนบัสเสริมในระบบมากขึ้น

2) นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (LSF) และดัชนีกำลังงานสูญเสีย (PLI) โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุบัสที่มีแรงดันต่ำและมีค่าดัชนี LSF สูง หรือเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุบัสที่มีค่าดัชนี PLI สูง สำหรับขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมหาได้จากเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม และนำเสนอการค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุ โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) ซึ่งช่วยกำจัดข้อจำกัดของตำแหน่งในการติดตั้งของวิธีการค้นหาในปัจจุบันที่จำกัดอยู่ที่บัสเท่านั้น ทำให้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุในระหว่างการจัดลองผลอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้ในระบบ โปรแกรมการจัดลองผลมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จากผลการทดสอบโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าทำให้แรงดันมีค่าสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากเทคนิค LTT ทำให้กำลังงานสูญเสียลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากดัชนี LSF และดัชนี PLI

3) นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ D-STATCOM และ SVC ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า กรณีจ่ายโหลดปกติและกรณีโหลดหนัก โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM ในสภาวะคงตัว ช่วยแก้ปัญหาเรื่องการค้นหาตำแหน่งติดตั้งในระหว่างการจำลองผล ทำให้ตำแหน่งติดตั้งสามารถเป็นได้ทุกตำแหน่งไม่จำกัดอยู่ที่บัสอีกต่อไป จากผลการทดสอบ ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่ได้จากการหาค่าเหมาะที่สุด ทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าสูงขึ้น และกำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าลดลง

4) นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนครราชสีมา 2 โดยเลือกวงจร 10 เพื่อเป็นกรณีศึกษา วงจร 10 มีบัสทั้งหมด 131 บัส โหลดรวม 3479.592 kW และ 1925.211 kVar แรงดันไฟฟ้าที่ส่งจากสถานีดันทางมีค่า 1.02 p.u. ทำให้ทุกบัสมีแรงดันค่อนข้างสูง กำลังงานสูญเสียมีค่า 43.83 kW การเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทำได้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุบัสที่มีค่า LSF สูงและค่าอิมพีแดนซ์ของ $V[i]$ ต่ำกว่า 1.055 หรือเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุบัสที่ดัชนี PLI มีค่าสูง หรือใช้เทคนิค LTT ร่วมกับเงินเนติกอัลกอริทึม จากผลการทดสอบ ตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่ได้จากเทคนิค LTT สามารถลดกำลังงานสูญเสียได้มากที่สุด จากนั้นจำลองสถานการณ์เมื่อความต้องการโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของสภาวะปกติ พบว่ากำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็น 181.996 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่ได้จากเทคนิค LTT สามารถลดกำลังงานสูญเสียให้เหลือเพียง 135 kW คิดเป็นร้อยละ 25.82 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด

7.2 ข้อเสนอแนะ

1) การกำหนดขนาดตัวเก็บประจุในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้เป็นการสวิตช์แบบอุดมคติ ทำให้ขนาดตัวเก็บประจุที่ได้จากการจำลองผลมีค่าละเอียดมากเกินไปซึ่งอาจต่างจากความเป็นจริงที่การสวิตช์ตัวเก็บประจุเป็นแบบขั้นบันไดและเป็นไปไม่ได้ทุกค่า ดังนั้นเพื่อให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงอาจกำหนดการสวิตช์เป็นแบบขั้นบันไดแทนการสวิตช์แบบอุดมคติ

2) ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ D-STATCOM และ SVC ที่ได้จากการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดร่วมกับเงินเนติกอัลกอริทึมสามารถเป็นได้ทุกตำแหน่งในระบบ ซึ่งในบางกรณีตำแหน่งที่ค้นหาได้สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าอาจไม่มีเสาให้ติดตั้ง ดังนั้น การนำไปใช้งานจริงอาจเลือกตำแหน่งติดตั้งโดยใช้บัสที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ค้นหาได้มากที่สุดก็ได้ สำหรับการกำหนดขอบเขตของตำแหน่งติดตั้งในระหว่างการหาค่าเหมาะที่สุด อาจใช้การแบ่งโซนติดตั้งเข้ามาช่วยในการเลือกตำแหน่งติดตั้งแทนการสุ่มทุกตำแหน่งเพื่อช่วยลดตัวแปรที่ต้องค้นหา

3) การหาค่าเหมาะที่สุดของตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ D-STATCOM และ SVC โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหนดต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเมื่อระบบทดสอบมีขนาดใหญ่ ทำให้การหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมไม่เหมาะกับระบบที่ต้องการความเร็วในการค้นหา ทั้งนี้อาจเลือกวิธีการค้นหาอื่นที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันแต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาประยุกต์ใช้ เช่น การโปรแกรมวิวัฒนาการหรือการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- ทศพล รัตนนิมิตต์ (2549). การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 123-125.
- ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2549). ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชา **วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 143-145.
- ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2549). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชา **วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 103-107.
- อุดมศักดิ์ ทองกระจาย และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2550). การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30)**. 229-232.
- อุดมศักดิ์ ทองกระจาย และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2550). เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการ **คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา มทส. ครั้งที่ 1**.
- AlHajri, M.F., AlRashidi, M.R., and El-Hawary, M.E. (2007). A novel discrete particle swarm optimization algorithm for optimal capacitor placement and sizing. **IEEE Trans. Power Systems**. 1286-1289.
- Chakravorty, M., and Das, D. (2001) Voltage stability analysis of radial distribution networks. **Electrical Power & Energy Systems**. 129-135.
- Chang, C.S., Chan, T.T., and Ho, S.L. (1993). AI applications and solution techniques for AC-railway-system control and simulation. **IEE Proc. B**. 140(3): 166-176.
- Chiou, J.P., Chang, C.F., and Su, C.T. (2004). Ant direction Hybrid differential evolution for solving large capacitor placement problems. **IEEE Trans. Power Systems**. 19(4): 1794-1800.
- Chung, C.Y., Tse, C.T., and David, A.K. (1997). New load flow technique based on load transfer and load buses elimination. **Proc. 4th APSCOM'97 Int. Conf. Advances in power system control, Operation and Management**. 614-619.

- Das, D. (2002). Reactive power compensation for radial distribution networks using genetic algorithm. **Electrical Power & Energy Systems**. 573-581.
- Das, D. (2008). Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method. **Electrical Power & Energy Systems**. 1-7.
- Das, D., Kothari, D.P., and Kalam, A. (1995). Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. **Electrical Power & Energy Systems**. 17(5): 335-346.
- Gallego, R.A., Monticelli, A., and Romeo, R. (2001). Optimal capacitor placement in radial distribution networks. **IEEE Trans. Power Systems**. 16(4): 630-637.
- Haque, M.H. (1999). Capacitor placement in radial distribution systems for loss reduction. **IEE Proc. Generation Transmission and Distribution**. 146(5): 501-505.
- Haque, M.H. (2000). A general load flow method for distribution systems. **Electrical Power Systems Research**. 54: 47-54.
- Huang, Y.C., Yang, H.T., and Huang, C.L. (1996). Solving the capacitor placement problem in radial distribution system using tabu search approach. **IEEE Trans. Power Systems**. 11(4): 1868-1873.
- Jawad Talad (1995). Modeling and elimination of load buses in power flow solutions. **IEEE Trans. Power Systems**. 10(3): 1154-1158.
- Keyhani, A., Abur, A., and Hao, S. (1989). Evaluation of power flow techniques for personal computers. **IEEE Trans. Power Systems**. 817-826.
- Khodr, H.M., Olsina, F.G., De Oliveira-De Jesus, P.M., and Yusta, J.M. (2007). Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems. **Electrical Power & Energy Systems**. 1-12.
- Koester, D.P., Ranka, S., and Fox, G.C. (1994). A parallel Gauss-Seidel algorithms for sparse power system matrices. **IEEE Trans. Power Systems**. 184-193.
- Ng, H.N., Salama, M.M.A., and Chikhani, A.Y. (2000). Capacitor allocation by approximate reasoning: fuzzy capacitor placement. **IEEE Trans. Power Delivery**. 15(1): 393-398.
- Prakash, K., and Sydulu M. (2007). Particle swarm optimization based capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Trans. Power Systems**. 1-5.
- Reddy, V.V.K., and Sydulu M. (2007). Index and GA based optimal location and sizing of distribution system capacitors. **IEEE Trans. Power Systems**. 1-4.

- Salama, M.M.A., and Chikhani, A.Y. (1993). A simplified network approach the var control problem for radial distribution systems. **IEEE Trans. Power Delivery**. 8(3): 1529-1535.
- Sharaf, A.M., and Ibrahim, S.T. (1996). Optimal capacitor placement in distribution networks. **Electric Power Systems Research**. 181-187.
- Su, C.T., and Tsai, C.C. (1996). A new fuzzy-reasoning approach to optimum capacitor allocation for primary distribution systems. **IEEE Proc. Int. Conf. Industrial Technology**. 237-241.
- Thongkrajay, U., and Kulworawanichpong, T. (2008). Convergence Improvement of Gauss-Seidel Power Flow Solution Using Load Transfer Technique. **In Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2008)**. 1-6.
- Tyagi, B., and Srivastava, S.C. (2006). A method for optimal placement of reactive sorces & reactive power procurement in competitive electricity markets. **IEEE Trans. Power Systems**. 1-6.
- Zhang, W., and Tolbert, L.M. (2005). Survey of reactive power planning methods **IEEE Trans. Power Systems**. 1-11.

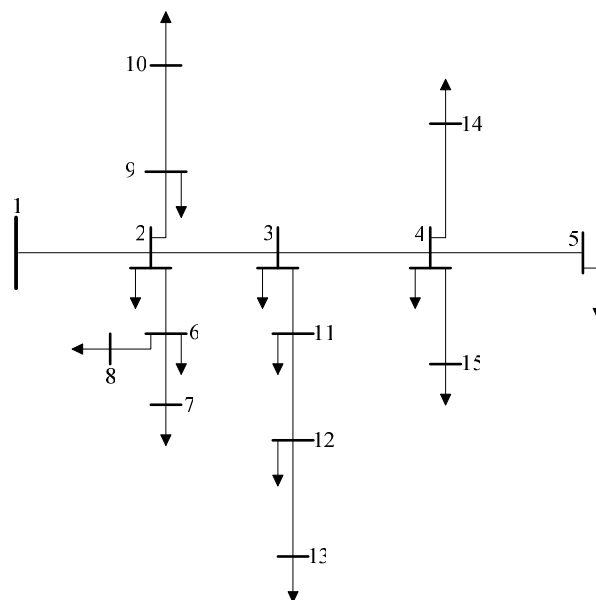
ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 5 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส และ 85 บัส และ ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ระบบทดสอบทุกระบบมีค่าฐานเท่ากับ 100 kVA รายละเอียดของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

ก.1 ระบบทดสอบ 15 บัส



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 15 บัส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 15 บัส

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Slack bus
2	1.00	0.0	0.0	0.0	44.1	44.991	PQ bus
3	1.00	0.0	0.0	0.0	70	71.414	PQ bus
4	1.00	0.0	0.0	0.0	140	142.829	PQ bus

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 15 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
5	1.00	0.0	0.0	0.0	44.1	44.991	PQ bus
6	1.00	0.0	0.0	0.0	140	142.829	PQ bus
7	1.00	0.0	0.0	0.0	140	142.829	PQ bus
8	1.00	0.0	0.0	0.0	70	71.414	PQ bus
9	1.00	0.0	0.0	0.0	70	71.414	PQ bus
10	1.00	0.0	0.0	0.0	44.1	44.991	PQ bus
11	1.00	0.0	0.0	0.0	140	142.829	PQ bus
12	1.00	0.0	0.0	0.0	70	71.414	PQ bus
13	1.00	0.0	0.0	0.0	44.1	44.991	PQ bus
14	1.00	0.0	0.0	0.0	70	71.414	PQ bus
15	1.00	0.0	0.0	0.0	140	142.829	PQ bus

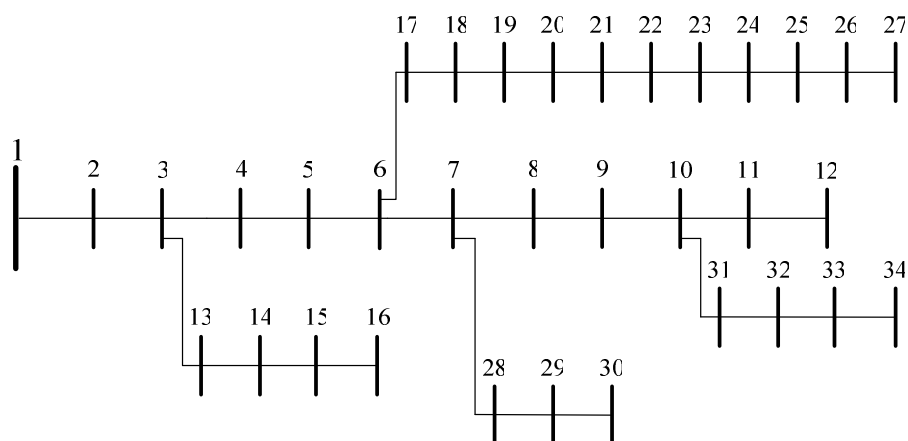
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 15 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	1.35309	1.32349	0.0	1
2	2	3	1.17024	1.14464	0.0	1
3	3	4	0.84111	0.82271	0.0	1
4	4	5	1.52348	1.02760	0.0	1
5	2	9	2.01317	1.35790	0.0	1
6	9	10	1.68671	1.13770	0.0	1
7	2	6	2.55727	1.72490	0.0	1
8	6	7	1.08820	0.73400	0.0	1
9	6	8	1.25143	0.84410	0.0	1
10	3	11	1.79553	1.21110	0.0	1
11	11	12	2.44845	1.65150	0.0	1
12	12	13	2.01317	1.35790	0.0	1

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 15 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
13	4	14	2.23081	1.50470	0.0	1
14	4	15	1.19702	0.80740	0.0	1

ก.2 ระบบทดสอบ 34 บัส



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 34 บัส

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 34 บัส

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Slack bus
2	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
3	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
4	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
5	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
6	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
7	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
8	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 34 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
9	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
10	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
11	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
12	1.00	0.0	0.0	0.0	137	84	PQ bus
13	1.00	0.0	0.0	0.0	72	45	PQ bus
14	1.00	0.0	0.0	0.0	72	45	PQ bus
15	1.00	0.0	0.0	0.0	72	45	PQ bus
16	1.00	0.0	0.0	0.0	13.5	7.5	PQ bus
17	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
18	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
19	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
20	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
21	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
22	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
23	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
24	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
25	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
26	1.00	0.0	0.0	0.0	230	142.5	PQ bus
27	1.00	0.0	0.0	0.0	137	85	PQ bus
28	1.00	0.0	0.0	0.0	75	48	PQ bus
29	1.00	0.0	0.0	0.0	75	48	PQ bus
30	1.00	0.0	0.0	0.0	75	48	PQ bus
31	1.00	0.0	0.0	0.0	57	34.5	PQ bus
32	1.00	0.0	0.0	0.0	57	34.5	PQ bus
33	1.00	0.0	0.0	0.0	57	34.5	PQ bus
34	1.00	0.0	0.0	0.0	57	34.5	PQ bus

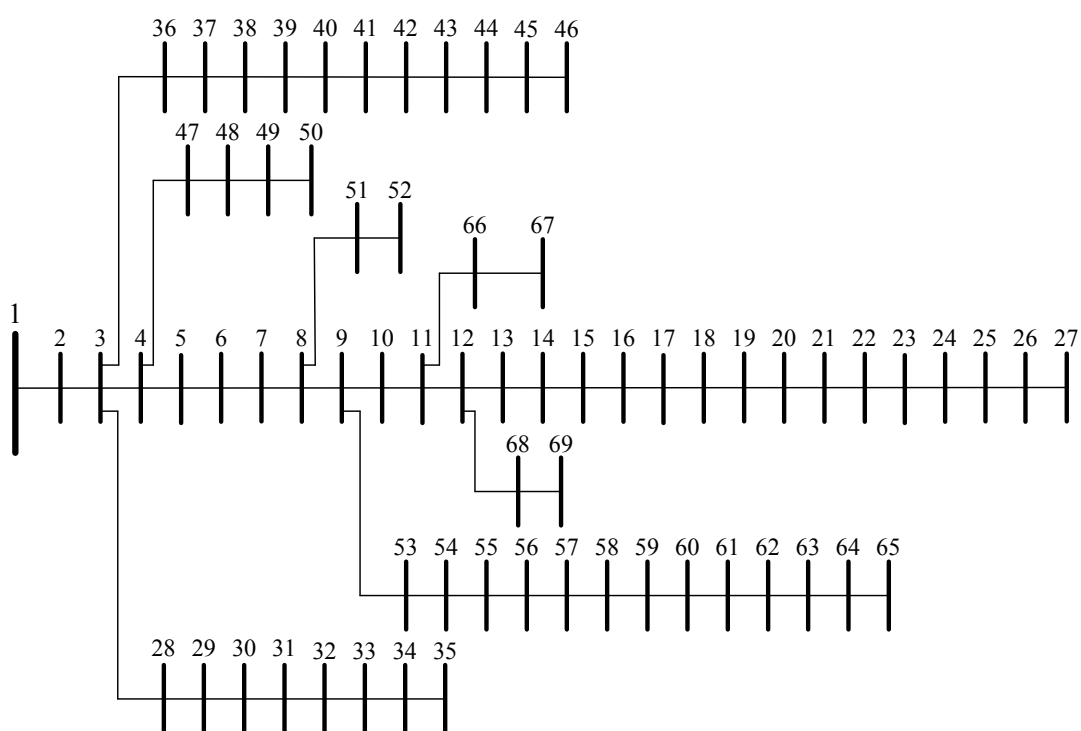
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 34 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.11700	0.04800	0.0	1
2	2	3	0.10725	0.04400	0.0	1
3	3	4	0.16445	0.04565	0.0	1
4	4	5	0.14950	0.04150	0.0	1
5	5	6	0.14950	0.04150	0.0	1
6	6	7	0.31440	0.05400	0.0	1
7	7	8	0.20960	0.03600	0.0	1
8	8	9	0.31440	0.05400	0.0	1
9	9	10	0.20960	0.03600	0.0	1
10	10	11	0.13100	0.02250	0.0	1
11	11	12	0.10480	0.01800	0.0	1
12	3	13	0.15720	0.02700	0.0	1
13	13	14	0.20960	0.03600	0.0	1
14	14	15	0.10480	0.01800	0.0	1
15	15	16	0.05240	0.00900	0.0	1
16	6	17	0.17940	0.04980	0.0	1
17	17	18	0.16445	0.04565	0.0	1
18	18	19	0.20790	0.04730	0.0	1
19	19	20	0.18900	0.04300	0.0	1
20	20	21	0.18900	0.04300	0.0	1
21	21	22	0.26200	0.04500	0.0	1
22	22	23	0.26200	0.04500	0.0	1
23	23	24	0.31440	0.05400	0.0	1
24	24	25	0.20960	0.03600	0.0	1
25	25	26	0.13100	0.02250	0.0	1
26	26	27	0.10480	0.01800	0.0	1
27	7	28	0.15720	0.02700	0.0	1

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 34 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
28	28	29	0.15720	0.02700	0.0	1
29	29	30	0.15720	0.02700	0.0	1
30	10	31	0.15720	0.02700	0.0	1
31	31	32	0.20960	0.03600	0.0	1
32	32	33	0.15720	0.02700	0.0	1
33	33	34	0.10480	0.01800	0.0	1

ก.3 ระบบทดสอบ 69 บัส



รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ 69 บัส

ตารางที่ ก.5 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 69 บัส

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Slack bus
2	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
3	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
4	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
5	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
6	1.00	0.0	0.0	0.0	2.6	2.2	PQ bus
7	1.00	0.0	0.0	0.0	40.4	30	PQ bus
8	1.00	0.0	0.0	0.0	75	54	PQ bus
9	1.00	0.0	0.0	0.0	30	22	PQ bus
10	1.00	0.0	0.0	0.0	28	19	PQ bus
11	1.00	0.0	0.0	0.0	145	104	PQ bus
12	1.00	0.0	0.0	0.0	145	104	PQ bus
13	1.00	0.0	0.0	0.0	8	5.5	PQ bus
14	1.00	0.0	0.0	0.0	8	5.5	PQ bus
15	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
16	1.00	0.0	0.0	0.0	45.5	30	PQ bus
17	1.00	0.0	0.0	0.0	60	35	PQ bus
18	1.00	0.0	0.0	0.0	60	35	PQ bus
19	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
20	1.00	0.0	0.0	0.0	1	0.6	PQ bus
21	1.00	0.0	0.0	0.0	114	81	PQ bus
22	1.00	0.0	0.0	0.0	5.3	3.5	PQ bus
23	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
24	1.00	0.0	0.0	0.0	28	20	PQ bus
25	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
26	1.00	0.0	0.0	0.0	14	10	PQ bus
27	1.00	0.0	0.0	0.0	14	10	PQ bus

ตารางที่ ก.5 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
28	1.00	0.0	0.0	0.0	26	18.6	PQ bus
29	1.00	0.0	0.0	0.0	26	18.6	PQ bus
30	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
31	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
32	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
33	1.00	0.0	0.0	0.0	14	10	PQ bus
34	1.00	0.0	0.0	0.0	19.5	14	PQ bus
35	1.00	0.0	0.0	0.0	6	4	PQ bus
36	1.00	0.0	0.0	0.0	26	18.55	PQ bus
37	1.00	0.0	0.0	0.0	26	18.55	PQ bus
38	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
39	1.00	0.0	0.0	0.0	24	17	PQ bus
40	1.00	0.0	0.0	0.0	24	17	PQ bus
41	1.00	0.0	0.0	0.0	1.2	1	PQ bus
42	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
43	1.00	0.0	0.0	0.0	6	4.3	PQ bus
44	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
45	1.00	0.0	0.0	0.0	39.22	26.3	PQ bus
46	1.00	0.0	0.0	0.0	39.22	26.3	PQ bus
47	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
48	1.00	0.0	0.0	0.0	79	56.4	PQ bus
49	1.00	0.0	0.0	0.0	384.7	274.5	PQ bus
50	1.00	0.0	0.0	0.0	384.7	274.5	PQ bus
51	1.00	0.0	0.0	0.0	40.5	28.3	PQ bus
52	1.00	0.0	0.0	0.0	3.6	2.7	PQ bus
53	1.00	0.0	0.0	0.0	4.35	3.5	PQ bus
54	1.00	0.0	0.0	0.0	26.4	19	PQ bus

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
55	1.00	0.0	0.0	0.0	24	17.2	PQ bus
56	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
57	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
58	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
59	1.00	0.0	0.0	0.0	100	72	PQ bus
60	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
61	1.00	0.0	0.0	0.0	1244	888	PQ bus
62	1.00	0.0	0.0	0.0	32	23	PQ bus
63	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
64	1.00	0.0	0.0	0.0	227	162	PQ bus
65	1.00	0.0	0.0	0.0	59	42	PQ bus
66	1.00	0.0	0.0	0.0	18	13	PQ bus
67	1.00	0.0	0.0	0.0	18	13	PQ bus
68	1.00	0.0	0.0	0.0	28	20	PQ bus
69	1.00	0.0	0.0	0.0	28	20	PQ bus

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.0005	0.0012	0.0	1
2	2	3	0.0005	0.0012	0.0	1
3	3	4	0.0015	0.0036	0.0	1
4	4	5	0.0251	0.0294	0.0	1
5	5	6	0.3660	0.1864	0.0	1
6	6	7	0.3811	0.1941	0.0	1
7	7	8	0.0922	0.0470	0.0	1
8	8	9	0.0493	0.0251	0.0	1

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
9	9	10	0.8190	0.2707	0.0	1
10	10	11	0.1872	0.0619	0.0	1
11	11	12	0.7114	0.2351	0.0	1
12	12	13	1.0300	0.3400	0.0	1
13	13	14	1.0440	0.3450	0.0	1
14	14	15	1.0580	0.3496	0.0	1
15	15	16	0.1966	0.0650	0.0	1
16	16	17	0.3744	0.1238	0.0	1
17	17	18	0.0047	0.0016	0.0	1
18	18	19	0.3276	0.1083	0.0	1
19	19	20	0.2106	0.0696	0.0	1
20	20	21	0.3416	0.1129	0.0	1
21	21	22	0.0140	0.0046	0.0	1
22	22	23	0.1591	0.0526	0.0	1
23	23	24	0.3463	0.1145	0.0	1
24	24	25	0.7488	0.2475	0.0	1
25	25	26	0.3089	0.1021	0.0	1
26	26	27	0.1732	0.0572	0.0	1
27	3	28	0.0044	0.0108	0.0	1
28	28	29	0.0640	0.1565	0.0	1
29	29	30	0.3978	0.1315	0.0	1
30	30	31	0.0702	0.0232	0.0	1
31	31	32	0.3510	0.1160	0.0	1
32	32	33	0.8390	0.2816	0.0	1
33	33	34	1.7080	0.5646	0.0	1
34	34	35	1.4740	0.4873	0.0	1
35	3	36	0.0044	0.0108	0.0	1

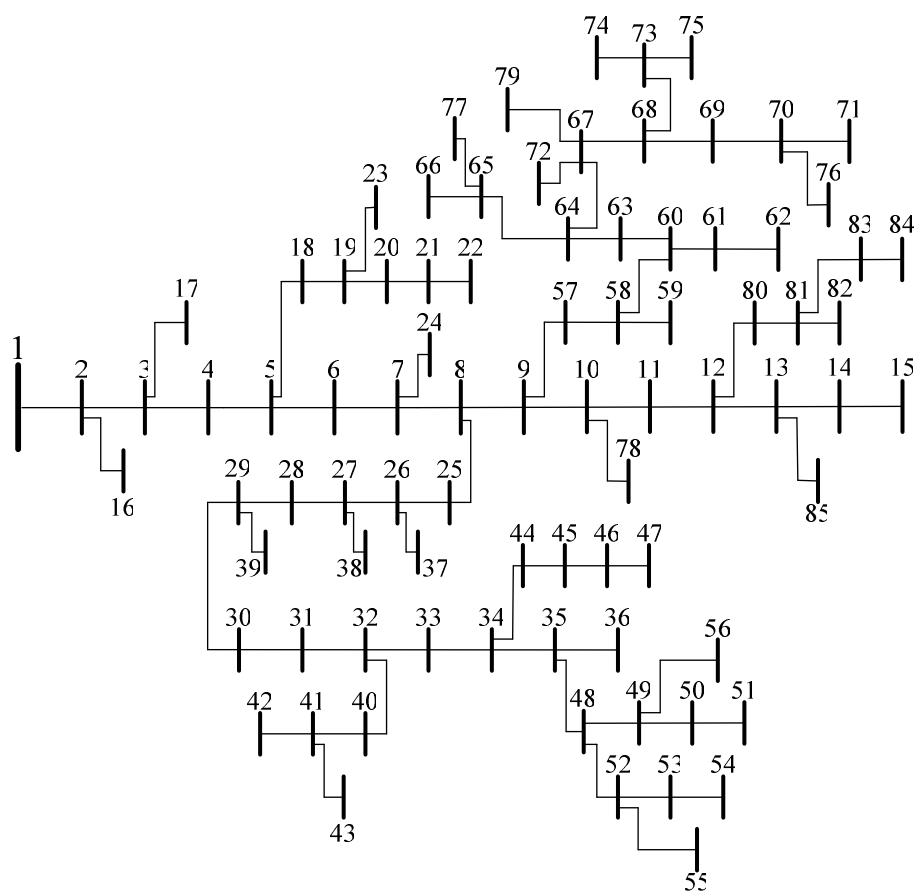
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
36	36	37	0.0640	0.1565	0.0	1
37	37	38	0.1053	0.1230	0.0	1
38	38	39	0.0304	0.0355	0.0	1
39	39	40	0.0018	0.0021	0.0	1
40	40	41	0.7283	0.8509	0.0	1
41	41	42	0.3100	0.3623	0.0	1
42	42	43	0.0410	0.0478	0.0	1
43	43	44	0.0092	0.0116	0.0	1
44	44	45	0.1089	0.1373	0.0	1
45	45	46	0.0009	0.0012	0.0	1
46	4	47	0.0034	0.0084	0.0	1
47	47	48	0.0851	0.2083	0.0	1
48	48	49	0.2898	0.7091	0.0	1
49	49	50	0.0822	0.2011	0.0	1
50	8	51	0.0928	0.0473	0.0	1
51	51	52	0.3319	0.1114	0.0	1
52	9	53	0.1740	0.0886	0.0	1
53	53	54	0.2030	0.1034	0.0	1
54	54	55	0.2842	0.1447	0.0	1
55	55	56	0.2813	0.1433	0.0	1
56	56	57	1.5900	0.5337	0.0	1
57	57	58	0.7837	0.2630	0.0	1
58	58	59	0.3042	0.1006	0.0	1
59	59	60	0.3861	0.1172	0.0	1
60	60	61	0.5075	0.2585	0.0	1
61	61	62	0.0974	0.0496	0.0	1
62	62	63	0.1450	0.0738	0.0	1

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
63	63	64	0.7105	0.3619	0.0	1
64	64	65	1.0410	0.5302	0.0	1
65	11	66	0.2012	0.0611	0.0	1
66	66	67	0.0047	0.0014	0.0	1
67	12	68	0.7394	0.2444	0.0	1
68	68	69	0.0047	0.0016	0.0	1

ก.4 ระบบทดสอบ 85 บัส



รูปที่ ก.4 ระบบทดสอบ 85 บัส

ตารางที่ ก.7 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 85 บัส

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Slack bus
2	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
3	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
4	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
5	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
6	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
7	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
8	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
9	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
10	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
11	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
12	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
13	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
14	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
15	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
16	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
17	1.00	0.0	0.0	0.0	112	114.26	PQ bus
18	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
19	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
20	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
21	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
22	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
23	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.17	PQ bus
24	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
25	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
26	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
27	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.7 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
28	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
29	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
30	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
31	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
32	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
33	1.00	0.0	0.0	0.0	14	14.28	PQ bus
34	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
35	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
36	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
37	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
38	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
39	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
40	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
41	1.00	0.0	0.0	0.0	0	0.0	PQ bus
42	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
43	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
44	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
45	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
46	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
47	1.00	0.0	0.0	0.0	14	14.28	PQ bus
48	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
49	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
50	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
51	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
52	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
53	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
54	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus

ตารางที่ ก.7 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
55	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
56	1.00	0.0	0.0	0.0	14	14.28	PQ bus
57	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
58	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
59	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
60	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
61	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
62	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
63	1.00	0.0	0.0	0.0	14	14.28	PQ bus
64	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
65	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
66	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
67	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
68	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
69	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
70	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
71	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
72	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
73	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
74	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
75	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
76	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
77	1.00	0.0	0.0	0.0	14	14.28	PQ bus
78	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
79	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
80	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
81	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
82	1.00	0.0	0.0	0.0	56	57.13	PQ bus
83	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus
84	1.00	0.0	0.0	0.0	14	14.28	PQ bus
85	1.00	0.0	0.0	0.0	35.28	35.99	PQ bus

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.108	0.075	0.0	1
2	2	3	0.163	0.112	0.0	1
3	3	4	0.217	0.149	0.0	1
4	4	5	0.108	0.074	0.0	1
5	5	6	0.435	0.298	0.0	1
6	6	7	0.272	0.186	0.0	1
7	7	8	1.197	0.820	0.0	1
8	8	9	0.108	0.074	0.0	1
9	9	10	0.598	0.410	0.0	1
10	10	11	0.544	0.373	0.0	1
11	11	12	0.544	0.373	0.0	1
12	12	13	0.598	0.410	0.0	1
13	13	14	0.272	0.186	0.0	1
14	14	15	0.326	0.223	0.0	1
15	2	16	0.728	0.302	0.0	1
16	3	17	0.455	0.189	0.0	1
17	5	18	0.82	0.340	0.0	1
18	18	19	0.637	0.264	0.0	1
19	19	20	0.455	0.189	0.0	1

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
20	20	21	0.819	0.340	0.0	1
21	21	22	1.548	0.642	0.0	1
22	19	23	0.182	0.075	0.0	1
23	7	24	0.910	0.378	0.0	1
24	8	25	0.455	0.189	0.0	1
25	25	26	0.364	0.151	0.0	1
26	26	27	0.546	0.226	0.0	1
27	27	28	0.273	0.113	0.0	1
28	28	29	0.546	0.226	0.0	1
29	29	30	0.546	0.226	0.0	1
30	30	31	0.273	0.113	0.0	1
31	31	32	0.182	0.075	0.0	1
32	32	33	0.182	0.075	0.0	1
33	33	34	0.819	0.340	0.0	1
34	34	35	0.637	0.264	0.0	1
35	35	36	0.182	0.075	0.0	1
36	26	37	0.364	0.151	0.0	1
37	27	38	1.002	0.416	0.0	1
38	29	39	0.546	0.226	0.0	1
39	32	40	0.455	0.189	0.0	1
40	40	41	1.002	0.416	0.0	1
41	41	42	0.273	0.113	0.0	1
42	41	43	0.455	0.189	0.0	1
43	34	44	1.002	0.416	0.0	1
44	44	45	0.911	0.378	0.0	1
45	45	46	0.911	0.378	0.0	1
46	46	47	0.546	0.226	0.0	1

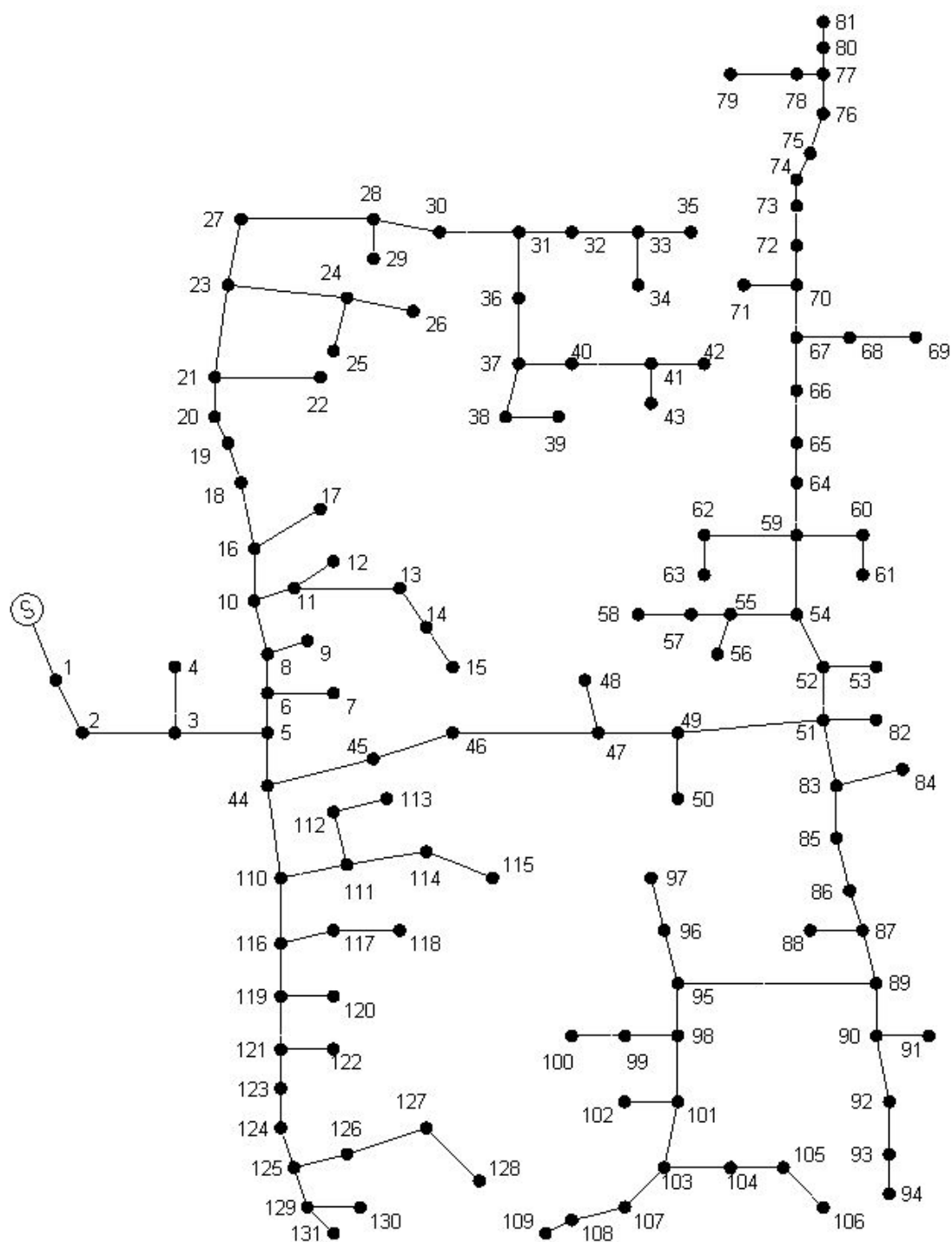
ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
47	35	48	0.637	0.264	0.0	1
48	48	49	0.182	0.075	0.0	1
49	49	50	0.364	0.151	0.0	1
50	50	51	0.455	0.189	0.0	1
51	48	52	1.366	0.567	0.0	1
52	52	53	0.455	0.189	0.0	1
53	53	54	0.546	0.226	0.0	1
54	52	55	0.546	0.226	0.0	1
55	49	56	0.546	0.226	0.0	1
56	9	57	0.273	0.113	0.0	1
57	57	58	0.819	0.340	0.0	1
58	58	59	0.182	0.075	0.0	1
59	58	60	0.546	0.226	0.0	1
60	60	61	0.728	0.302	0.0	1
61	61	62	1.002	0.415	0.0	1
62	60	63	0.182	0.075	0.0	1
63	63	64	0.728	0.302	0.0	1
64	64	65	0.182	0.075	0.0	1
65	65	66	0.182	0.075	0.0	1
66	64	67	0.455	0.189	0.0	1
67	67	68	0.910	0.378	0.0	1
68	68	69	1.092	0.453	0.0	1
69	69	70	0.455	0.189	0.0	1
70	70	71	0.546	0.226	0.0	1
71	67	72	0.182	0.075	0.0	1
72	68	73	1.184	0.491	0.0	1
73	73	74	0.273	0.113	0.0	1

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
74	73	75	1.002	0.416	0.0	1
75	70	76	0.546	0.226	0.0	1
76	65	77	0.091	0.037	0.0	1
77	10	78	0.637	0.264	0.0	1
78	67	79	0.546	0.226	0.0	1
79	12	80	0.728	0.302	0.0	1
80	80	81	0.364	0.151	0.0	1
81	81	82	0.091	0.037	0.0	1
82	81	83	1.092	0.453	0.0	1
83	83	84	1.002	0.416	0.0	1
84	13	85	0.819	0.340	0.0	1

ก.5 ระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ ก.5 ระบบทดสอบ 131 บัส

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Slack bus
2	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
3	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
4	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
5	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
6	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
7	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
8	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
9	1.00	0.0	0.0	0.0	46.668	25.821	PQ bus
10	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
11	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
12	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
13	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
14	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
15	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
16	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
17	1.00	0.0	0.0	0.0	14.583	8.070	PQ bus
18	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
19	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
20	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
21	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
22	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
23	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
24	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
25	1.00	0.0	0.0	0.0	46.668	25.821	PQ bus
26	1.00	0.0	0.0	0.0	46.668	25.821	PQ bus
27	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
28	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
29	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
30	1.00	0.0	0.0	0.0	26.250	14.523	PQ bus
31	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
32	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
33	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
34	1.00	0.0	0.0	0.0	46.668	25.821	PQ bus
35	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
36	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
37	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
38	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
39	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
40	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
41	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
42	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
43	1.00	0.0	0.0	0.0	46.668	25.821	PQ bus
44	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
45	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
46	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
47	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
48	1.00	0.0	0.0	0.0	14.583	8.070	PQ bus
49	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
50	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
51	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
52	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
53	1.00	0.0	0.0	0.0	46.668	25.821	PQ bus
54	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
55	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
56	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
57	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
58	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
59	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
60	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
61	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
62	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
63	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
64	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
65	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
66	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
67	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
68	1.00	0.0	0.0	0.0	192.501	106.506	PQ bus
69	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
70	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
71	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
72	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
73	1.00	0.0	0.0	0.0	14.583	8.070	PQ bus
74	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
75	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
76	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
77	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
78	1.00	0.0	0.0	0.0	145.833	80.688	PQ bus
79	1.00	0.0	0.0	0.0	145.833	80.688	PQ bus
80	1.00	0.0	0.0	0.0	26.250	14.523	PQ bus
81	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
82	1.00	0.0	0.0	0.0	14.583	8.070	PQ bus
83	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
84	1.00	0.0	0.0	0.0	43.749	24.207	PQ bus
85	1.00	0.0	0.0	0.0	26.250	14.523	PQ bus
86	1.00	0.0	0.0	0.0	8.751	4.842	PQ bus
87	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
88	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
89	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
90	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
91	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
92	1.00	0.0	0.0	0.0	43.749	24.207	PQ bus
93	1.00	0.0	0.0	0.0	43.749	24.207	PQ bus
94	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
95	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
96	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
97	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
98	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
99	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
100	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
101	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
102	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
103	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
104	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
105	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
106	1.00	0.0	0.0	0.0	14.583	8.070	PQ bus
107	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
108	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูล巴士ของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
109	1.00	0.0	0.0	0.0	46.668	25.821	PQ bus
110	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
111	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
112	1.00	0.0	0.0	0.0	145.833	80.688	PQ bus
113	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
114	1.00	0.0	0.0	0.0	72.918	40.344	PQ bus
115	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
116	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
117	1.00	0.0	0.0	0.0	145.833	80.688	PQ bus
118	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
119	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
120	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
121	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
122	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
123	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
124	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
125	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
126	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
127	1.00	0.0	0.0	0.0	583.332	322.749	PQ bus
128	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
129	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
130	1.00	0.0	0.0	0.0	29.166	16.137	PQ bus
131	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.03097	0.05894	0.0	1
2	2	3	0.60684	1.15503	0.0	1
3	3	4	0.04146	0.07890	0.0	1
4	3	5	0.58915	0.61654	0.0	1
5	5	6	0.08040	0.15303	0.0	1
6	6	7	0.01753	0.01029	0.0	1
7	6	8	0.01022	0.01945	0.0	1
8	8	9	0.01703	0.01000	0.0	1
9	8	10	0.02032	0.03868	0.0	1
10	10	11	0.08639	0.05071	0.0	1
11	11	12	0.00639	0.00375	0.0	1
12	11	13	0.11930	0.07003	0.0	1
13	13	14	0.07210	0.04232	0.0	1
14	14	15	0.01603	0.00941	0.0	1
15	10	16	0.01246	0.02371	0.0	1
16	16	17	0.02748	0.01613	0.0	1
17	16	18	0.08174	0.15558	0.0	1
18	18	19	0.00954	0.01816	0.0	1
19	19	20	0.02083	0.03964	0.0	1
20	20	21	0.01025	0.01951	0.0	1
21	21	22	0.01003	0.00589	0.0	1
22	21	23	0.02113	0.04021	0.0	1
23	23	24	0.11369	0.11897	0.0	1
24	24	25	0.01362	0.01848	0.0	1
25	24	26	0.01503	0.01573	0.0	1
26	23	27	0.00477	0.00908	0.0	1
27	27	28	0.02882	0.05486	0.0	1

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
28	28	29	0.02539	0.01491	0.0	1
29	28	30	0.03433	0.06534	0.0	1
30	30	31	0.01315	0.02503	0.0	1
31	31	32	0.02485	0.04731	0.0	1
32	32	33	0.01693	0.03222	0.0	1
33	33	34	0.01639	0.00962	0.0	1
34	33	35	0.06123	0.11655	0.0	1
35	31	36	0.21557	0.12791	0.0	1
36	36	37	0.11330	0.06723	0.0	1
37	37	38	0.04437	0.06019	0.0	1
38	38	39	0.00536	0.00728	0.0	1
39	37	40	0.09429	0.05595	0.0	1
40	40	41	0.09594	0.05693	0.0	1
41	41	42	0.12282	0.07288	0.0	1
42	41	43	0.00895	0.00525	0.0	1
43	5	44	0.00396	0.00753	0.0	1
44	44	45	0.00378	0.00719	0.0	1
45	45	46	0.03436	0.06540	0.0	1
46	46	47	0.04019	0.07650	0.0	1
47	47	48	0.03305	0.01940	0.0	1
48	47	49	0.05057	0.09626	0.0	1
49	49	50	0.01075	0.00631	0.0	1
50	49	51	0.02810	0.05348	0.0	1
51	51	52	0.04261	0.08111	0.0	1
52	52	53	0.03867	0.02270	0.0	1
53	52	54	0.01630	0.03103	0.0	1
54	54	55	0.01754	0.01030	0.0	1

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
55	55	56	0.02692	0.01580	0.0	1
56	55	57	0.02558	0.01502	0.0	1
57	57	58	0.00109	0.00064	0.0	1
58	54	59	0.01235	0.02350	0.0	1
59	59	60	0.31401	0.18433	0.0	1
60	60	61	0.00609	0.00357	0.0	1
61	59	62	0.26815	0.15740	0.0	1
62	62	63	0.01559	0.00915	0.0	1
63	59	64	0.03605	0.06861	0.0	1
64	64	65	0.08319	0.15834	0.0	1
65	65	66	0.06636	0.12630	0.0	1
66	66	67	0.01656	0.03152	0.0	1
67	67	68	0.20486	0.12025	0.0	1
68	68	69	0.01613	0.00947	0.0	1
69	67	70	0.00068	0.00130	0.0	1
70	70	71	0.00632	0.01203	0.0	1
71	70	72	0.02498	0.04754	0.0	1
72	72	73	0.01372	0.02612	0.0	1
73	73	74	0.00499	0.00949	0.0	1
74	74	75	0.01940	0.03692	0.0	1
75	75	76	0.01982	0.03772	0.0	1
76	76	77	0.01737	0.03306	0.0	1
77	77	78	0.03463	0.01400	0.0	1
78	78	79	0.00921	0.00372	0.0	1
79	77	80	0.02621	0.04989	0.0	1
80	80	81	0.01464	0.02787	0.0	1
81	51	82	0.02868	0.01684	0.0	1

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
82	51	83	0.01556	0.02961	0.0	1
83	83	84	0.08083	0.04745	0.0	1
84	83	85	0.03324	0.06326	0.0	1
85	85	86	0.00875	0.01665	0.0	1
86	86	87	0.00605	0.01151	0.0	1
87	87	88	0.01497	0.00879	0.0	1
88	87	89	0.00404	0.00769	0.0	1
89	89	90	0.07925	0.04652	0.0	1
90	90	91	0.26576	0.15600	0.0	1
91	90	92	0.06945	0.04077	0.0	1
92	92	93	0.01014	0.00595	0.0	1
93	93	94	0.00603	0.00354	0.0	1
94	89	95	0.08265	0.04852	0.0	1
95	95	96	0.07668	0.03099	0.0	1
96	96	97	0.06829	0.04009	0.0	1
97	95	98	0.12256	0.07194	0.0	1
98	98	99	0.08744	0.05133	0.0	1
99	99	100	0.01179	0.00692	0.0	1
100	98	101	0.11100	0.06515	0.0	1
101	101	102	0.10943	0.06423	0.0	1
102	101	103	0.01587	0.00931	0.0	1
103	103	104	0.04512	0.02649	0.0	1
104	104	105	0.11649	0.06838	0.0	1
105	105	106	0.10344	0.06072	0.0	1
106	103	107	0.05929	0.03481	0.0	1
107	107	108	0.01954	0.01147	0.0	1
108	108	109	0.13609	0.07988	0.0	1

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
109	44	110	0.06509	0.12389	0.0	1
110	110	111	0.07247	0.04254	0.0	1
111	111	112	0.02381	0.03230	0.0	1
112	112	113	0.00541	0.00734	0.0	1
113	111	114	0.07774	0.04563	0.0	1
114	114	115	0.01887	0.01107	0.0	1
115	110	116	0.01363	0.02594	0.0	1
116	116	117	0.08037	0.04718	0.0	1
117	117	118	0.00980	0.00575	0.0	1
118	116	119	0.06563	0.12491	0.0	1
119	119	120	0.00539	0.00316	0.0	1
120	119	121	0.17210	0.32757	0.0	1
121	121	122	0.00796	0.00467	0.0	1
122	121	123	0.06027	0.11471	0.0	1
123	123	124	0.22834	0.28640	0.0	1
124	124	125	0.04319	0.08221	0.0	1
125	125	126	0.01448	0.01467	0.0	1
126	126	127	0.96090	0.97327	0.0	1
127	127	128	0.01589	0.01610	0.0	1
128	125	129	0.03664	0.06973	0.0	1
129	129	130	0.00755	0.00443	0.0	1
130	129	131	0.02565	0.04883	0.0	1

ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แควรีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี 25-26 ตุลาคม 2550 หน้า 22-232.
2. “เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า”. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา มทส. ครั้งที่ 1 ณ สุรธรรมนาคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 1-2 พฤศจิกายน 2550.
3. “**Convergence Improvement of Gauss-Seidel Power Flow Solution Using Load Transfer Technique**”. In Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2008), pp.1-6, 11-13 February 2008.
4. “**Application of Load Transfer Technique for Distribution Power Flow Analysis**”. In Proceedings of the WASET International Conference on Electric Power and Systems (EPES 2008). 4-6 July 2008.

ประวัติผู้เขียน

นายอุดมศักดิ์ ทองกระจาย เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนทุ่งมนวิทยาการ อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 1 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2549 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 6 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 (4) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 (5) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 และ (6) ปฏิบัติการพื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในขณะศึกษา:

1. การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด
2. เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
3. Convergence Improvement of Gauss-Seidel Power Flow Solution Using Load Transfer Technique.
4. Application of Load Transfer Technique for Distribution Power Flow Analysis.