



รายงานการวิจัย

เทคนิคการถ่ายโอนโหลดทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง
(Generalized Load Transfer Technique for Power System Analysis)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลรวานิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายอุดมศักดิ์ ทองกระจาย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2551

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้
และขอขอบคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่อนุเคราะห์ข้อมูลระบบทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนสูง การต่อเชื่อมโหลดและการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในบางกรณีเป็นการเพิ่มบัสใหม่ให้ระบบ ส่งผลให้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้ง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อถ่ายโอนโหลดในรูปแบบ กระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ กำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า ที่ติดตั้งอยู่ที่โหนดเสริมให้ไปอยู่ที่โหนดข้างเคียง ด้วยหลักการนี้ไม่ว่าจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยจำนวนมากเพียงใดก็ตาม จำนวน โหนดที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีค่าเท่าเดิมเสมอ วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล และนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด เขียนโปรแกรมโดยใช้ MATLAB ระบบทดสอบ 34 บัส และ 69 บัส ถูกนำมาใช้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ จากการดำเนินงานวิจัยพบว่า เวลาที่ใช้ประมวลผลลดลง การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด ช่วยแก้ปัญหาสถานะเลว (ill-condition) ได้เป็นอย่างดี การหาค่าแห่งติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า อาจพิจารณาจากดัชนี *LSF* (Loss Sensitivity Factors) หรือ ดัชนี *PLI* (Power Loss Index) ส่วนขนาดของตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด งานวิจัยนี้นำเสนอการหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดร่วมกับจินเนติกอัลกอริทึม และนำระบบทดสอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา 2 (วงจร 10) มาเป็นกรณีศึกษา การหาค่าแห่งติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบน้อยที่สุด จากการดำเนินงานวิจัยพบว่า ค่าแห่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ทำการค้นหาโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าลดลง

ABSTRACT

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. The 34 bus, and 69 bus test 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 Authority of Thailand) 22 kV power distribution systems

in Nakhon Ratchasima 2 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

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	1
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	3
2.3 แบบจำลองการกำจัดโนด	4
2.4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า	5
2.4.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	5
2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	8
2.5 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า	12
2.6 การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ	13
2.7 สรุป	13

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3	เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า	14
3.1	บทนำ.....	14
3.2	เทคนิคการถ่ายโอนโหลด.....	14
3.2.1	แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า	14
3.2.2	แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์.....	17
3.2.3	แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า.....	19
3.3	การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	20
3.4	ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	23
3.5	การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	29
3.6	ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	30
3.7	เทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชย	35
3.7.1	อุปกรณ์ชดเชยตัวเก็บประจุ	36
3.7.2	อุปกรณ์ชดเชย SVC	38
3.7.3	อุปกรณ์ชดเชย D-STATCOM.....	39
3.8	สรุป	41
4	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	42
4.1	บทนำ.....	42
4.2	แบบจำลองตัวเก็บประจุ.....	42
4.3	การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีความไวต่อกำลังงานสูญเสีย.....	42
4.3.1	ตัวประกอบความไวการสูญเสีย LSF.....	43
4.3.2	ดัชนีกำลังงานสูญเสีย PLI	45
4.4	การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า	46
4.4.1	การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	46
4.4.2	การหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ.....	46

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.3	จีนเนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น.....	47
4.4.4	การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุ โดยใช้จีนเนติกอัลกอริทึม ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด.....	48
4.5	ผลการทดสอบ.....	48
4.6	สรุป.....	57
5	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM ที่เหมาะสม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	58
5.1	บทนำ.....	58
5.2	แบบจำลอง SVC.....	58
5.3	แบบจำลอง D-STATCOM.....	59
5.4	ผลการทดสอบ.....	60
5.5	สรุป.....	66
6	การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV	67
6.1	บทนำ.....	67
6.2	ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV นครราชสีมา 2 (วงจร 10).....	67
6.3	การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV.....	68
6.3.1	การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	69
6.3.2	การหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ.....	69
6.4	ผลการทดสอบ.....	70
6.5	สรุป.....	76
7	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	77
7.1	สรุป.....	77
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	79
	รายการอ้างอิง.....	81

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ระบบทดสอบ.....	ก-1
ภาคผนวก ข. บทความที่ ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	ข-1
ภาคผนวก ค. ประวัติผู้เขียน	ค-1

สารบัญตาราง

หน้า

3.1	ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทของโหลดทดสอบ.....	24
3.2	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า.....	25
3.3	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์.....	25
3.4	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า.....	26
3.5	ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 34 บัส.....	27
3.6	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า.....	28
3.7	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์.....	28
3.8	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า.....	29
3.9	ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทของโหลดทดสอบ.....	31
3.10	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า.....	32
3.11	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์.....	32
3.12	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า.....	33
3.13	ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 69 บัส.....	33
3.14	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า.....	34

สารบัญญัตราง (ต่อ)

หน้า

3.15	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลอง โหลดอิมพีแดนซ์.....	35
3.16	จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส กรณีแบบจำลอง โหลดกำลังไฟฟ้า.....	35
4.1	ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 34 บัส	49
4.2	ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 69 บัส	50
4.3	ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 34 บัส	52
4.4	ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 69 บัส	53
4.5	ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 34 บัส.....	54
4.6	แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 34 บัส	55
4.7	กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส	55
4.8	ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 69 บัส.....	56
4.9	แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 69 บัส	57
4.10	กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส	57
5.1	ค่าตัวแปรของเงินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB.....	62
5.2	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ.....	62
5.3	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM	63
5.4	ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ.....	64
5.5	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่า ของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM	65
6.1	ดัชนี <i>LSF</i> ของระบบทดสอบ 131 บัส	71
6.2	ดัชนี <i>PLI</i> ของระบบทดสอบ 131 บัส	72
6.3	ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 131 บัส สถานะโหลดปกติ.....	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

6.4	แรงดันบั๊สก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 131 บั๊ส สถานะโหลดปกติ.....	75
6.5	กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 131 บั๊ส สถานะโหลดปกติ.....	76

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น.....6

รูปที่ 2.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 บัส.....12

รูปที่ 3.1 บัส l ที่มีโหลดกระแสไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่.....15

รูปที่ 3.2 แบบจำลองการย้ายโหลดกระแสไฟฟ้าจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m 16

รูปที่ 3.3 บัส l ที่มีโหลดอิมพีแดนซ์ต่อเชื่อมอยู่.....17

รูปที่ 3.4 แบบจำลองการย้ายโหลดอิมพีแดนซ์จากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m17

รูปที่ 3.5 บัส l ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่.....19

รูปที่ 3.6 แบบจำลองการย้ายโหลดกำลังไฟฟ้าจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m19

รูปที่ 3.7 บัส k และบัส m เมื่อมีการถ่ายโอนโหลดในระบบไฟฟ้า.....20

รูปที่ 3.8 บัส l ที่มีตัวเก็บประจุต่อเชื่อมอยู่.....36

รูปที่ 3.9 แบบจำลองการย้ายตัวเก็บประจุจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m 37

รูปที่ 3.10 บัส l ที่มี SVC ต่อเชื่อมอยู่.....38

รูปที่ 3.11 ตัวชดเชยค่าซัสเซปแดนซ์ของ SVC ที่บัส l ใด ๆ38

รูปที่ 3.12 แบบจำลองการย้าย SVC จากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m 39

รูปที่ 3.13 บัส l ที่มี D-STATCOM ต่อเชื่อมอยู่.....39

รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลนอร์ตันของ D-STATCOM40

รูปที่ 3.15 แบบจำลองการย้าย D-STATCOM จากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m40

รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส43

รูปที่ 4.2 แผนภาพระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเส้นเดียว.....45

รูปที่ 5.1 ตัวชดเชยค่าซัสเซปแดนซ์ปรับค่าได้ของ SVC ที่บัส k ใด ๆ.....59

รูปที่ 5.2 แบบจำลอง D-STATCOM ในสถานะคงตัวที่บัส k ใด ๆ.....60

รูปที่ 6.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV นครราชสีมา 2 (วงจร 10).....68

รูปที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 34 บัส..... ก-1

รูปที่ ก.2 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 69 บัส..... ก-1

รูปที่ ก.2 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส..... ก-2

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมมีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้นตามลำดับแต่การสร้างสถานีไฟฟ้าและการส่งจ่ายทำได้อย่างจำกัด ซึ่งเกิดจากเหตุผลหลายประการ เช่น งบประมาณ และพื้นที่ในการสร้างสายส่งไฟฟ้าเพื่อส่ง ไปยังผู้ใช้ไฟ ผลที่เกิดตามมาคือ สายส่งไฟฟ้ามีจำกัดแต่ปริมาณผู้ใช้ไฟฟ้ามีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันตกในสายส่งมากขึ้น เกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ามากขึ้นเนื่องจากปริมาณโหลดที่มากเกินไปซึ่งปัญหาเหล่านี้มักเกิดกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV และ 24 kV ทำให้การไฟฟ้าต้องหาวิธีในการแก้ปัญหาในเรื่องนี้ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาที่ง่ายและสะดวกกว่าการสร้างเส้นทางสายส่งเพิ่มนั่นก็คือ การนำเอาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกหรืออุปกรณ์ในการตรวจสอบความผิดพลาดของระบบไฟฟ้ากำลังมาติดตั้งระหว่างสายส่งเพื่อเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ผลจากการนำอุปกรณ์ชดเชยเหล่านี้มาติดตั้งระหว่างสายส่งนี้ทำให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนมากขึ้นตาม ไปด้วย เนื่องจากการติดตั้งตัวชดเชยในตำแหน่งดังกล่าวส่งผลให้จำนวน โหนดในระบบไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ชดเชยที่ติดตั้ง การวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เช่นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า การคำนวณความผิดพลาด ตลอดจนการวางแผนการจ่ายโหลดจะทำให้ยากขึ้นและใช้เวลาคำนวณที่ยาวนาน

จากปัญหาที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ทำให้การวิเคราะห์ระบบ ไฟฟ้ากำลังทำได้ยากยิ่งขึ้นทำให้เกิดคำถามตามมาว่า สามารถทำให้การวิเคราะห์ระบบ ไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยต่าง ๆ ได้อย่างไร โดยที่ผลที่ได้ยังคงเหมือนเดิมทุกประการแต่สามารถลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาอัลกอริทึมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบ ไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนดังกล่าวนี้แทนการวิเคราะห์แบบเดิม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อพัฒนาเทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าให้ง่ายและรวดเร็วขึ้นในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้ากำลัง
- นำอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้วิเคราะห์ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการ ไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค นครราชสีมา และระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะคงตัว
- พิจารณาระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการชดเชย โดยเน้นไปที่การชดเชยแบบขนานเป็นหลัก
- ทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสายป้อนสมดุลในสถานะการจ่ายโหลดสมดุล
- ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ไม่พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- พัฒนาเทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้แบบจำลองโหลดในรูปกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และอุปกรณ์ FACTS
- พัฒนาเทคนิคการถ่ายโอนโหลดเพื่อคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าให้มีอัตราการใช้และใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็ว
- นำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา และระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE
- แก้ปัญหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนโหลดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้แบบจำลองโหลดในรูป กระแสไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ กำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า
- ได้อัลกอริทึมใหม่ที่ทำให้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ามีความสะดวกมากยิ่งขึ้น
- ได้แนวทางใหม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่ง่ายยิ่งขึ้น
- ได้โปรแกรมจำลองผล โดยใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นใหม่และมีคุณภาพยิ่งขึ้น
- ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แบบจำลองการกำจัด โหนด การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล และนิวตัน-ราฟสัน ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง และการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเบื้องต้นเกี่ยวกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรม

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น การหาผลเฉลยซึ่งประกอบด้วยขนาดของแรงดันและมุมเฟสที่บัสต้องอาศัยกระบวนการวนรอบเข้ามาช่วยเพื่อหาผลเฉลย วิธีการหาผลเฉลยดังกล่าวได้ถูกนำเสนออย่างต่อเนื่อง ดังปรากฏใน Das, Nagi, and Kothari (1994), Das, Kothari, and Kalam (1995), and Haque (2000) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่มา ๆ ได้มีการนำเอาการคำนวณแบบขนานเข้ามาช่วย เพื่อให้การคำนวณใช้เวลาลดลง ดังปรากฏใน Koester, Ranka, and Fox (1994) การปรับปรุงอัตราการลู่เข้าของวิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อแก้ปัญหาสภาวะเลว (ill-condition) โดยการรวมพจน์อันดับสองเข้าในสมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ดังปรากฏใน Keyhani, Abur, and Hao (1989) นอกจากนี้มีผู้วิจัยบางกลุ่มได้นำเทคนิคการกำจัด โหนดในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อลดขนาดของระบบไฟฟ้ากำลังให้เล็กลง จากนั้นจึงคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ดังเช่น Jawad Talaq (1995) ได้นำเสนอสมการแบบจำลองโหนด เพื่อใช้ในการกำจัดบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้ระบบไฟฟ้าถูกลดรูปและแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะถูกลดขนาดให้เหลือเท่ากับจำนวนของบัสควบคุมแรงดันและตัวแปรของแบบจำลองการลดรูปคือบัสที่ถูกควบคุมแรงดัน ทำให้ตัวแปรที่ต้องคำนวณหาเหลือเพียงมุมของแรงดันบัสเท่านั้น จากนั้นจึงใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันคำนวณหาแรงดันบัสที่ถูกลดรูป เทคนิคดังกล่าวทำให้จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง งานวิจัยของ Chung, Tse, and David (1997) ได้เสนอแนวทางการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแนวทางใหม่โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอน โหลดและการกำจัดบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง วิธีการนี้คล้ายกับวิธีของ Jawad Talaq ที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

ด้วยเทคนิคนี้พบว่าค่าอัตราส่วน R/X ของระบบไฟฟ้าไม่มีผลต่อการรู้เข้าของคำตอบ จำนวนรอบ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองโหลดที่ใช้ด้วย โดยทุกเทคนิคที่พัฒนาขึ้นล้วนแต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือ ลดระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ปรับปรุงอัตราการใช้รวมไปถึงการประหยัดหน่วยความจำของอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาล้วนมุ่งไปที่หลักการพื้นฐานของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

2.3 แบบจำลองการกำจัดโนด (node elimination model)

เทคนิคการกำจัด โนดเป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณและหน่วยความจำที่คอมพิวเตอร์ต้องใช้ประมวลผลในการแก้ปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ เทคนิคการกำจัด โนดที่ไม่มีโหลดต่ออยู่ โดยใช้การลดรูปเมตริกซ์โครงข่าย เช่น เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ โดยการจัดรูปสมการเมตริกซ์และแทนค่าตัวแปรให้เหมาะสมเพื่อกำจัดตัวแปรประจำโนดที่ไม่มีโหลดออกไป พิจารณาได้ดังนี้

ถ้ากำหนดให้ โครงข่ายทางไฟฟ้ากำลังเขียนแทนได้ด้วยสมการต่อไปนี้

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

ดำเนินการจัดเรียง โนดของสมการเมตริกซ์ดังกล่าวใหม่ โดยนำโนดที่มีกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฉีดเข้าระบบหรือกระแสจากโหลดดึงออกจาก โนดมาเรียงซ้อนกัน เรียกว่า เมตริกซ์ย่อย $[I_G]$ และ โนดที่ไม่มีกระแสฉีดเข้าหรือดึงออกไป 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

การศึกษากาการไหลของกำลังไฟฟ้า หรือที่รู้จักกันในชื่อ power flow ซึ่งรูปแบบของปัญหา จะเป็นการหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในแต่ละสายส่ง ตลอดจนการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่ง ซึ่งในแต่ละบัสมีค่าที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

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

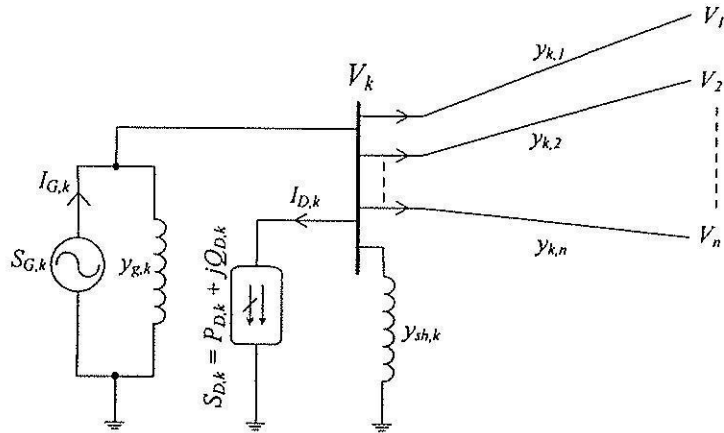
Load bus หรือ P-Q bus เป็นบัสที่ค่า P และ Q คงที่ (P and Q are specified) ส่วน $|V|$ และ δ เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

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 และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่าบัส

อ้างอิง (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 โดยใช้การวิเคราะห์แบบ โหนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่โหนด k ใด ๆ ดังนี้

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

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{(h)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h-1)})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i^{(h-1)} \right\} \quad (2-10)$$

สมการที่ (2-10) เป็นการปรับปรุงตามระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์ ดังนั้นจะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลดังสมการที่ (2-11)

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2-11)$$

สมการที่ (2-11) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีกำหนดบัสสแลก เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วยและไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัสเท่านั้น

นอกจากนี้ การใช้ตัวประกอบเร่ง γ สามารถนำมาใช้ได้กับการคำนวณด้วยวิธีนี้เพื่อเร่งอัตราการลู่เข้าให้มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น สำหรับปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าค่าตัวประกอบเร่ง γ ที่เหมาะสมนั้น มีค่าประมาณ 1.3-1.7 (न्छขัย กุวรรณิชพนธ์, 2549) โดยกำหนดให้

$$V_{k,acc}^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2-12)$$

$$V_k^{(h+1)} = V_k^{(h)} + \gamma (V_{k,acc}^{(h+1)} - V_k^{(h)}) \quad (2-13)$$

สมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ แสดงเพียงแบบจำลองโหลดในรูปของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ในระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากแบบจำลองโหลดในรูปกำลังไฟฟ้ายังมีแบบจำลองโหลดที่นิยมใช้อีก 2 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองโหลดในรูปกระแสไฟฟ้า (current load model) และแบบจำลองโหลดในรูปอิมพีแดนซ์ (impedance load model) สำหรับสมการที่ใช้คำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้ามคำนวณได้จากสมการที่ (2-14) และกรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์คำนวณได้จากสมการที่ (2-15) ดังนี้

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} - I_{D,k} \right\} \quad (2-14)$$

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

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

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ดังนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป
- 2) คำนวณค่าแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ 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

2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

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

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

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

$$(S_{sch,k})^* = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (2-17)$$

สมการที่ (2-17) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากสมการที่ (2-17) เมื่อพิจารณาในรูปพิกัดเชิงขั้ว จะได้ว่า

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

$$P_{sch,k} - jQ_{sch,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| V_k V_i \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-18)$$

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

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| V_k V_i \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-19)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันบัสที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้ จะทำให้สมการสมดุลอย่างไรก็ตาม ในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบัส ซึ่งทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นแบบราบเรียบ โดยการกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นของทุกบัสมีค่า $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. หรือใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้าที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบ จะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บัสขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches) ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟดังนี้

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

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

$$\text{โดยที่ } P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-20)$$

$$Q_{cal,k} = -\sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2-21)$$

ใช้ระเบียบวิธีการวนรอบของนิวตัน-ราฟสัน ประมาณผลเฉลยของระบบสมการใน
รอบการคำนวณที่ $k+1$ ใดๆ 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

$$\Delta P_k = \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2-22)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกำลังไฟฟัรแอกทีฟ จะได้

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2-23)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J1 & \vdots & \vdots & \vdots & J2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J3 & \vdots & \vdots & \vdots & J4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

จากสมการที่ (2-24) สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ $h+1$ โดยคำนวณเมตริกซ์ผกผันจาโคเบียน จะได้

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

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

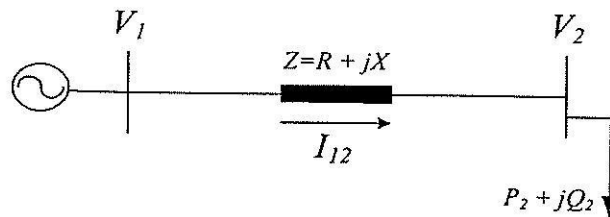
1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป

2) คำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)

- 3) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด
- 4) คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ $J1-J4$
- 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

2.5 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power distribution systems)

เมื่อคำนวณผลเฉลยแรงดันบัสเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง เพื่อดูการกระจายของการไหลของกำลังไฟฟ้าว่ามีทิศทางไปในทางใดและเป็นปริมาณเท่าใด กำลังงานสูญเสียในสายส่ง ตลอดจนแรงดันตกเป็นเท่าไร คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ระบบทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดและประหยัด (ธนดชัย กุลรวรานิชพงษ์, 2549)



รูปที่ 2.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 บัส

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 2.2 กำลังงานสูญเสียในสายส่งของระบบไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการ $S_{loss} = P_{loss} + jQ_{loss} = (I_{12})^2 Z$ โดยกำลังงานสูญเสียประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ กำลังงานสูญเสียแอกทีฟ P_{loss} และกำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ Q_{loss}

$$P_{loss} = (I_{12})^2 R = \left(\frac{V_1 - V_2}{Z} \right)^2 R \quad (2-25)$$

$$Q_{loss} = (I_{12})^2 X = \left(\frac{V_1 - V_2}{Z} \right)^2 X \quad (2-26)$$

2.6 การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power compensation)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ เพื่อลดกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่งผลกระทบต่อกำลังงานสูญเสียและแรงดันตกในระบบ ดังนั้น การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อชดเชยความต้องการของโหลดและชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียต่ำและระดับแรงดันตกมีค่าลดลง (ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์, 2549) นอกจากนี้การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟยังช่วยเพิ่มขีดจำกัดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของสายส่งให้ มีค่าสูงขึ้นด้วย การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุกรม รูปแบบขนาน และรูปแบบผสม ตัวชดเชยที่กล่าวมาจะมีหน้าที่และวิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แตกต่างกัน

2.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึงแบบจำลองการกำจัด โหนด การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ไม่ได้พิจารณาผลของการเพิ่มโหลดหรือการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ากับกำลังงานสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาผลของตำแหน่งและปริมาณการเพิ่มโหลดเข้าไปในระบบ จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า

3.1 บทนำ

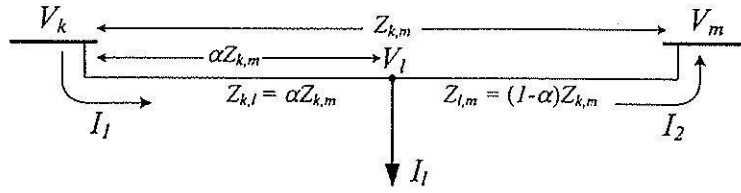
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคการถ่ายโอนโหลดในระบบไฟฟ้า ประกอบด้วยแบบจำลองโหลด 3 ประเภท คือ แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า โหลดอิมพีแดนซ์ และโหลดกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว ลำดับต่อมาได้นำเสนอการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลและวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอกับวิธีมาตรฐาน และกล่าวถึงเทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานในสภาวะคงตัว 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 l อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการต่อเชื่อมโหลดกระแสไฟฟ้าเข้าในระบบ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะนี้จะมีตัวแปรเพิ่มเข้ามาอีกหลายตัวแปรและมีความยุ่งยาก การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ง่ายขึ้นถ้าบัสเสริม l ในระบบถูกกำจัดออกไป ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเทคนิคการถ่ายโอน โหลดที่บัสเสริมให้ไปอยู่ที่บัสข้างเคียง โดยมีหลักการดังนี้



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 $I_2 = I_1 - I_l$

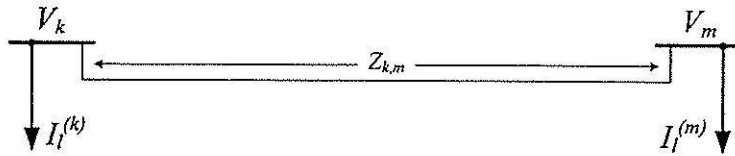
กำจัด I_2 โดยการแทนค่า $I_2 = I_1 - I_l$ ในสมการที่ (3-3) จะได้ว่า

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

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

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

แบบจำลองการย้ายโหลดกระแสไฟฟ้าที่บัสเสริม l ใด ๆ ในรูปที่ 3.1 ไปยังบัสข้างเคียง สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการย้ายโหลดกระแสไฟฟ้าจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m

จากรูปที่ 3.2 โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอน โหลด 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 $I_2 = I_l - I_1$ ลงในสมการที่ (3-2) และจัดรูปสมการ จะได้

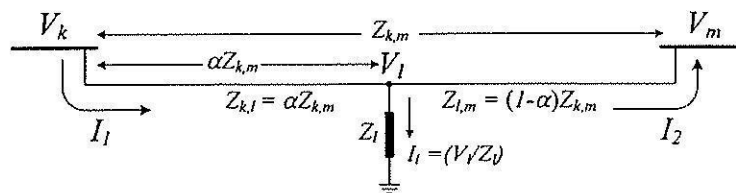
$$I_1 = \frac{V_l - V_m}{Z_{l,m}} + I_l \quad (3-9)$$

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

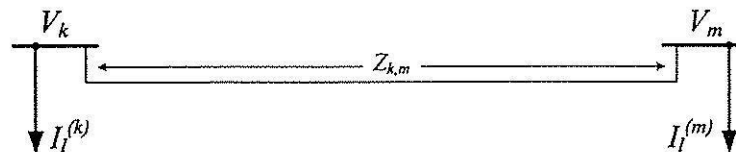
$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m - \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \quad (3-10)$$

3.2.2 แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ (impedance load model)

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.3 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส l เป็นบัสเสริมที่เกิดจากการต่อเชื่อม โหลดอิมพีแดนซ์เข้าในระบบ 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

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{V_l}{Z_l} \right) \quad (3-11)$$

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{V_l}{Z_l} \right) \quad (3-12)$$

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

$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m} Z_l}{Z_{k,m} Z_l + Z_{k,l} Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l} Z_l}{Z_{k,m} Z_l + Z_{k,l} Z_{l,m}} \right) V_m \quad (3-13)$$

แทนค่า V_l จากสมการที่ (3-13) ลงในสมการที่ (3-11) และจัดรูปสมการ จะได้

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

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

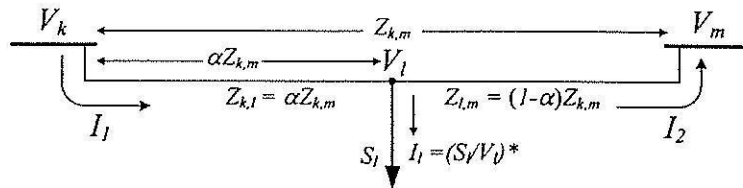
ในทำนองเดียวกัน สำหรับ $I_l^{(m)}$ จะได้

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

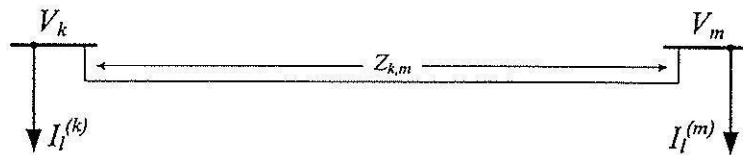
สมการที่ (3-11) และ (3-12) เป็นสมการสำหรับการใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข ส่วนสมการที่ (3-14) และ (3-15) เป็นสมการที่ได้จากการแทนค่าโดยตรง

3.2.3 แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า (power load model)

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.5 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส l เป็น บัสเสริมที่เกิดจากการต่อเชื่อมโหลดกำลังไฟฟ้าเข้าในระบบ โดยใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับ แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า สำหรับแบบจำลองการย้ายโหลดกำลังไฟฟ้าที่บัสเสริม l ใด ๆ ใน รูปที่ 3.5 ไปยังบัสข้างเคียง สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรมูลในรูปที่ 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

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \tag{3-16}$$

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \tag{3-17}$$

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

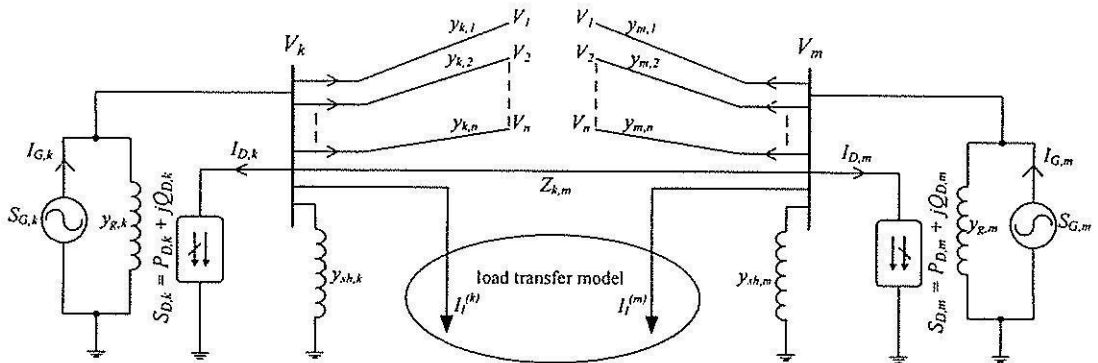
$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m - \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l} \right)^* \quad (3-18)$$

เนื่องจากไม่สามารถจัดรูปสมการให้แยกกันได้อย่างอิสระ ดังนั้น ในการคำนวณ จะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับแรงดันที่บัส l ใด ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณในรอบต่อไป ดังนั้น จะได้ว่า

$$V_i^{(h+1)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m - \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \left(\frac{S_l}{V_l^{(h)}} \right)^* \quad (3-19)$$

3.3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

หัวข้อนี้นำเสนอวิธีการคำนวณผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด หลักการนี้ใช้เทคนิคการกำจัดบัสเสริมที่เพิ่มเข้ามาในระบบโดยการถ่ายโอนไปอยู่ที่บัสข้างเคียงที่มีอยู่เดิม ทำให้จำนวนสมการไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.7 บัส k และบัส m เมื่อมีการถ่ายโอน โหลดในระบบไฟฟ้า

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้การวิเคราะห์แบบ โหนด (nodal analysis) จะได้ สมการสมดุลกระแสที่ โหนด k ใด ๆ ดังนี้

$$y_{k,l}(V_k - V_l) + y_{k,z}(V_k - V_z) + \dots + y_{k,n}(V_k - V_n) = I_{G,k} - I_{D,k} - I_l^{(k)} \quad (3-20)$$

โดยที่ $I = yV$ จะได้

$$I_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = I_{G,k} - I_{D,k} - I_i^{(k)} \quad (3-21)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{G,k} - S_{D,k}}{V_k} \right)^* - I_i^{(k)} \quad (3-22)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (3-23)

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* - (V_k)^* I_i^{(k)} \quad (3-23)$$

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)

$I_i^{(k)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนจากบัส i 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

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

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

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_k - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)} \quad (3-24)$$

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 (3-24) โดยใช้ตัวแปรเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ จะได้ว่า

$$Y_{k,k} V_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)} \quad (3-25)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)} \quad (3-26)$$

จากสมการที่ (3-25) จะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (3-27)

$$V_k = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i - I_l^{(k)} \right\} \quad (3-27)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{(h)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h-1)})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i^{(h-1)} - I_i^{(k)} \right\} \quad (3-28)$$

สมการที่ (3-28) เป็นการปรับปรุงตามระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์ สำหรับระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเคลนั้น จะอาศัยหลักการในรอบการคำนวณใด ๆ ดังนั้น จะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเคลที่บัส k ดังสมการที่ (3-29)

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} - I_i^{(k)} \right\} \quad (3-29)$$

สำหรับบัส m จะได้

$$V_m^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{m,m}} \left\{ \frac{P_{sch,m} - jQ_{sch,m}}{(V_m^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{m-1} Y_{m,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=m+1}^n Y_{m,i} V_i^{(h)} - I_i^{(m)} \right\} \quad (3-30)$$

สมการที่ (3-29) และ (3-30) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

3.4 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคล

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคล แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของตำแหน่งติดตั้งโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของจำนวนการเพิ่ม โหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย เช่น ทดสอบกับระบบทดสอบ 34 บัส โดยระบบทดสอบเป็นระบบทดสอบสายป้อนแบบ 3 เฟสสมดุล การทดสอบจะแสดงการเปรียบเทียบจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณระหว่างการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลมาตรฐาน (SGSPF) และการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด (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 ผลของตำแหน่งติดตั้งกับคุณสมบัติการดูเข้าของผลเฉลย

สำหรับส่วนที่ 1 ทำการทดสอบ โดยติดตั้ง โหลดเพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดยติดตั้งโหลดที่สายส่งระหว่างบัส 2 บัสซึ่งทำให้เกิดบัสเสริมขึ้น แล้วแปรค่าตำแหน่งติดตั้งจากต้นสายส่ง (ที่ระยะ 10% ของความยาวสายส่ง) ไปจนถึงปลายของสายส่ง (ที่ระยะ 90% ของความยาวสายส่ง) เพื่อดูผลของตำแหน่งการติดตั้ง โหลดกับการดูเข้าของผลเฉลย ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทของโหลดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภท โหลดทดสอบ

ระบบทดสอบ	โหลดติดตั้งระหว่างบัส	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
34 บัส	19 – 20	$18 - j15$	$1500 + j1200$	$200 + j150$

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 34 บัส เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกระแสไฟฟ้าขนาด $18 - j15$ A ระหว่างบัสที่ 19 และ 20 แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 สำหรับวิธี SGSPF เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดอยู่ใกล้บัสต้นของสายส่ง (ตำแหน่ง 10% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่ามากและจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง (ตำแหน่ง 50% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสปลายของสายส่ง (ตำแหน่ง 90% ของความยาวสายส่ง) จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 1278 รอบ และ 1.6813 วินาที ตามลำดับ เมื่อตำแหน่งติดตั้งโหลดเข้าใกล้บัสที่ 20 สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่ม โหลดมีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยมาก โดยจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจาก 974 รอบ เป็น 975 รอบเมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสที่ 20 จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 975 รอบ และ 1.1825 วินาที ตามลำดับ ส่วนผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบ โดยใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์ขนาด $1500 + j1200 \Omega$ ระหว่างบัสที่ 19 และ 20 แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ผลที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า สำหรับวิธี SGSPF จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่ามาก เมื่อตำแหน่งการเพิ่ม โหลดเข้าใกล้บัสเดิมในระบบ จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 1258 รอบ และ 1.6773 วินาที ตามลำดับ สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่ม โหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เมื่อเพิ่ม โหลดโดยใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าขนาด $200 + j150$ kVA

ระหว่างบัสที่ 19 และ 20 แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ผลที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ สำหรับวิธี SGSPF จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่ามาก เมื่อตำแหน่งการเพิ่มโหลดเข้าใกล้บัสเดิมในระบบ จำนวนรอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณมากที่สุด คือ 1272 รอบ และ 1.7554 วินาที ตามลำดับ สำหรับวิธี TGSPF ตำแหน่งการเพิ่มโหลดแทบไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจาก 970 รอบ เป็น 971 รอบ เมื่อตำแหน่งเพิ่ม โหลดเข้าใกล้บัสที่ 20 เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SGSPF

ตารางที่ 3.2 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 3.3 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

ตารางที่ 3.3 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส
กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ (ต่อ)

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา SGSPF/TGSPF
	SGSPF	TGSPF	SGSPF	TGSPF	
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 3.4 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 34 บัส

ระบบทดสอบ 34 บัส ประกอบด้วยโหลด 5 ชุด ถูกติดตั้งไว้ในระบบทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 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 โดยใช้แบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดมากขึ้นวิธี SGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณมากขึ้น 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 ส่วนผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.7 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 และผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 3.8 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 จำนวนรอบ

เพิ่มขึ้นเป็น 988 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ย 1.2209 วินาที เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TGSPF ใช้จำนวนรอบและเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SGSPF

ตารางที่ 3.6 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส
กรณีแบบจำลอง โหลดกระแสไฟฟ้า

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 3.7 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 34 บัส
กรณีแบบจำลอง โหลดอิมพีแดนซ์

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 3.8 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 หลักการนี้ใช้เทคนิคการกำจัดเสริมที่เพิ่มเข้ามาในระบบโดยการถ่ายโอนไปอยู่ที่บัสข้างเคียงที่มีอยู่เดิม โหลดที่ถูกถ่ายโอนไปยังบัสข้างเคียงจะถูกเขียนในรูปของกำลังไฟฟ้า ซึ่งแนวทางในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามี 2 แนวทางด้วยกัน คือ กำลังงานไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนจะถูกนำไปรวมกับส่วนของ S_{cal} และแนวทางที่สองคือ นำไปรวมกับส่วนของ S_{sch} ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแนวทางที่สองเพื่อวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากสมการกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการถ่ายโอนโหลดถ้านำไปรวมกับส่วนของ S_{cal} จะมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้การคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนมีความซับซ้อนตามไปด้วย แต่ปัญหาเหล่านี้จะหมดไป ถ้านำกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการถ่ายโอนโหลดไปรวมกับส่วนของ S_{sch} ดังนี้

$$\text{จากสมการที่ (3-26)} \quad \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - I_l^{(k)}$$

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

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

$$(S_{sch,k}^{old})^* - (V_k)^* I_l^{(k)} = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (3-31)$$

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

$$\text{บัส } k: (S_{sch,k}^{new})^* = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (3-32)$$

$$\text{บัส } m: (S_{sch,m}^{new})^* = (V_m)^* \sum_{i=1}^n Y_{m,i} V_i \quad (3-33)$$

สมการที่ (3-32) และ (3-33) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส k และ บัส m ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด

3.6 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาค่าของตำแหน่งติดตั้งโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของจำนวนการเพิ่มโหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย เช่น ทดสอบกับระบบทดสอบ 69 บัส โดยระบบทดสอบเป็นระบบทดสอบสายป้อนแบบ 3 เฟส สมดุล 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 3.9

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ

ระบบทดสอบ	ติดตั้งระหว่างบัสที่	ประเภทของโหลดทดสอบ		
		กระแสไฟฟ้า (A)	อิมพีแดนซ์ (Ω)	กำลังไฟฟ้า (kVA)
69 บัส	49 – 50	$17 - j15$	$1200 + j1000$	$150 + j120$

1.1 ระบบทดสอบ 69 บัส

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากรณีระบบทดสอบ 69 บัส เมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกระแสไฟฟ้าขนาด $17 - j15$ A ระหว่างบัสที่ 49 และ 50 แสดงไว้ในตารางที่ 3.10 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 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 3.11 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.081 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากับวิธี SNRPF และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.077 วินาที และผลการทดสอบเมื่อเพิ่มโหลดโดยใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าขนาด $150 + j120$ kVA ระหว่างบัสที่ 49 และ 50 แสดงไว้ในตารางที่ 3.12 ตำแหน่งติดตั้งโหลดไม่มีผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ โดยวิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.081 วินาที สำหรับวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากับวิธี SNRPF และใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณประมาณ 0.077 วินาที เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสอง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี SNRPF

ตารางที่ 3.10 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 3.11 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส
กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
	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 3.12 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

ส่วนที่ 2 ผลของจำนวนการเพิ่ม โหลดกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย

สำหรับส่วนที่ 2 ทำการทดสอบโดยติดตั้งโหลดเพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดยติดตั้งโหลดที่
กึ่งกลางของสายส่งระหว่างบัส 2 บัส ซึ่งทำให้เกิดบัสเสริมขึ้น แล้วเพิ่มจำนวนโหลดเข้าในระบบ
เพื่อดูผลของจำนวนการเพิ่ม โหลดกับการลู่เข้าของผลเฉลย

2.1 ระบบทดสอบ 69 บัส

ระบบทดสอบ 69 บัส ประกอบด้วย โหลด 5 ชุด ถูกติดตั้งเข้าในระบบทดสอบที่
ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ข้อมูลตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และประเภทโหลดทดสอบ กรณีระบบทดสอบ 69 บัส

ชุด โหลด	โหลดติดตั้ง ระหว่างบัส	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 โดยใช้แบบจำลอง โหลดกระแสไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3.14 เมื่อเพิ่มโหลดจาก 1 ชุด จนถึง 4 ชุด วิธี SNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนโหลดเป็น 5 ชุด จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 6 รอบ และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นตามจำนวนชุดโหลดที่เพิ่มเข้าไปในระบบ 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 ชุดเข้าไปในระบบใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากัน และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนผลทดสอบการเพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลอง โหลดอิมพีแดนซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.15 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 และผลทดสอบการเพิ่ม โหลดในระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลอง โหลดกำลังไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 3.16 กรณีเพิ่มโหลดเข้าไปในระบบไฟฟ้า 1 ชุดวิธี SNRPF และวิธี TNRPF ใช้จำนวนรอบในการคำนวณ 5 รอบเท่ากัน และเมื่อเพิ่มโหลดเข้าไปในระบบเป็น 5 ชุด ทั้งสองวิธียังคงใช้จำนวนรอบในการคำนวณเท่ากัน คือ 5 รอบ สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนการเพิ่มโหลดเข้าไปในระบบ กรณีเพิ่ม โหลด 1 ชุดวิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.0815 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณ 0.0782 วินาที เมื่อเพิ่ม โหลดในระบบเป็น 5 ชุดวิธี SNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.0949 วินาที และวิธี TNRPF ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น 0.0783 วินาที ตารางที่ 3.14 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส

กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้า

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา SNRPF/TNRPF
	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 3.15 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส
กรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์

จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา SNRPF/TNRPF
	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 3.16 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของระบบทดสอบ 69 บัส
กรณีแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้า

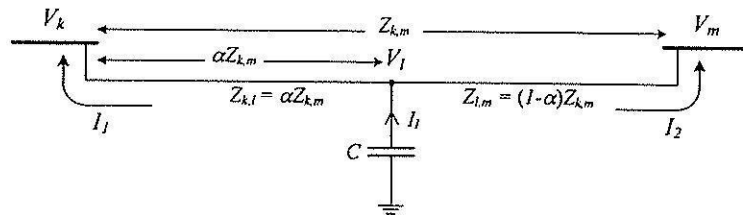
จำนวนชุดโหลด	จำนวนรอบ		เวลาเฉลี่ย (วินาที)		อัตราส่วนเวลา SNRPF/TNRPF
	SNRPF	TNRPF	SNRPF	TNRPF	
1	5	5	0.0815	0.0782	1.0422
1-2	5	5	0.0850	0.0780	1.0897
1-3	5	5	0.0869	0.0782	1.1113
1-4	5	5	0.0898	0.0782	1.1483
1-5	5	5	0.0949	0.0783	1.2120

3.7 เทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชย (compensators transfer technique)

การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในบางกรณีเป็นการเพิ่มบัสใหม่ในระบบ ทำให้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้ง จากเทคนิคการถ่ายโอนโหลดที่ได้แสดงไปในหัวข้อที่ 3.2 นำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชยในสภาวะคงตัวเพื่อวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองอุปกรณ์ชดเชย 3 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุ SVC และ D-STATCOM มีหลักการดังนี้

3.7.1 อุปกรณ์ชดเชยตัวเก็บประจุ

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.8 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส l อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ ต้องการกำจัดบัสเสริม l ออกไปเพื่อให้ขนาดของระบบไม่เปลี่ยนแปลง มีหลักการดังนี้



รูปที่ 3.8 บัส l ที่มีตัวเก็บประจุต่อเชื่อมอยู่

จากรูปที่ 3.1 วิเคราะห์โดยใช้ KVL และ KCL จะได้ว่า

$$\text{Loop } I_1 : V_l - V_k = Z_{k,l} I_1 \quad (3-34)$$

$$\text{Loop } I_2 : V_l - V_m = Z_{l,m} I_2 \quad (3-35)$$

นำสมการที่ (3-34) ลบกับสมการที่ (3-35) จะได้

$$V_m - V_k = Z_{k,l} I_1 - Z_{l,m} I_2 \quad (3-36)$$

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

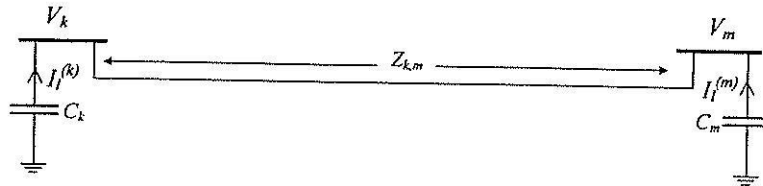
กำจัด I_2 โดยการแทนค่า $I_2 = I_l - I_1$ ในสมการที่ (3-36) และจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$I_1 = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l + \left(\frac{V_m - V_k}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \quad (3-37)$$

กำจัด I_1 โดยการแทนค่า $I_1 = I_l - I_2$ ในสมการที่ (3-36) และจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$I_2 = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l - \left(\frac{V_m - V_k}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) \quad (3-38)$$

แบบจำลองการย้ายตัวเก็บประจุที่บัสเสริม l ใดๆ ในรูปที่ 3.8 ไปยังบัสข้างเคียง สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แบบจำลองการย้ายตัวเก็บประจุจากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และจากรูปที่ 3.9 โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนด จะได้ว่า

$$I_l^{(k)} = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \quad (3-39)$$

$$I_l^{(m)} = \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \quad (3-40)$$

การหาแรงดันที่บัส l หาได้ดังนี้
จากสมการที่ (3-34) จะได้ว่า

$$I_1 = \frac{V_l - V_k}{Z_{k,l}} \quad (3-41)$$

แทนค่า $I_2 = I_l - I_1$ ลงในสมการที่ (3-35) และจัดรูปสมการ จะได้

$$I_1 = \frac{V_m - V_l}{Z_{l,m}} + I_l \quad (3-42)$$

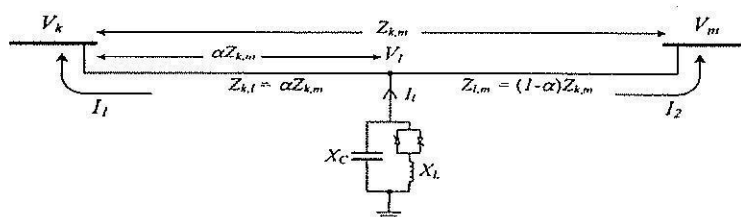
แทนค่า I_1 จากสมการที่ (3-42) ลงในสมการที่ (3-41) จะได้

$$V_l = \left(\frac{Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_k + \left(\frac{Z_{k,l}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) V_m + \left(\frac{Z_{k,l} Z_{l,m}}{Z_{k,l} + Z_{l,m}} \right) I_l \quad (3-43)$$

เนื่องจากตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังนิยมกำหนดด้วยกำลังไฟฟ้ามากกว่า กระแสไฟฟ้างั้นเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขนี้ กระแสไฟฟ้า I_l สามารถเขียนแทนได้ด้วย $(S_l / V_l)^*$

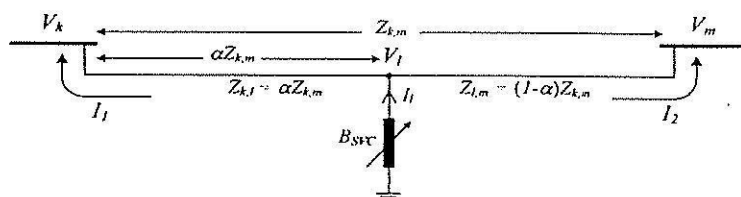
3.7.2 อุปกรณ์ชดเชย SVC

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.10 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส l อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการติดตั้ง SVC ในระบบ สามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลชั้สเซปแทนซ์ดังรูปที่ 3.11 ต้องการกำจัดบัสเสริม l ออกไปเพื่อใหขนาดของระบบไม่เปลี่ยนแปลง มีหลักการดังนี้

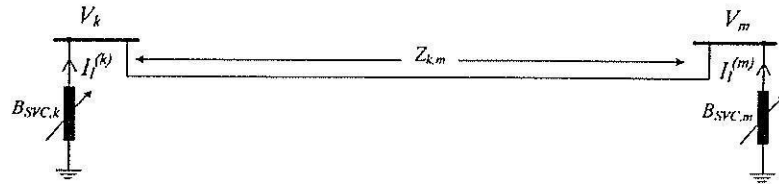


รูปที่ 3.10 บัส l ที่มี SVC ต่อเชื่อมอยู่

จากรูปที่ 3.11 แบบจำลองของ SVC ในสถานะคงตัวเขียนแทนด้วยค่าชั้สเซปแทนซ์ต่อขนานกับบัส l ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับเทคนิคการถ่ายโอนโพลดิมพีแดนซ์ในหัวข้อที่ 3.2.2 โดยการแทนค่า $I_l = (V_l j B_{SVC})$ ค่าที่ได้จากการถ่ายโอนไปยังบัสข้างเคียงเขียนในรูปสมการกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-44) และ (3-45) แรงดันไฟฟ้าที่บัส l คำนวณได้จากสมการที่ (3-46)



รูปที่ 3.11 ตัวชดเชยค่าชั้สเซปแทนซ์ของ SVC ที่บัส l ใด ๆ



รูปที่ 3.12 แบบจำลองการย้าย SVC จากบัส / มายังบัสข้างเคียง k และ m

$$I_l^{(k)} = \frac{(1-\alpha)jB_{SVC}}{\beta_1} (V_k - \alpha(V_k - V_m)) \tag{3-44}$$

$$I_l^{(m)} = \frac{\alpha jB_{SVC}}{\beta_1} (V_k - \alpha(V_k - V_m)) \tag{3-45}$$

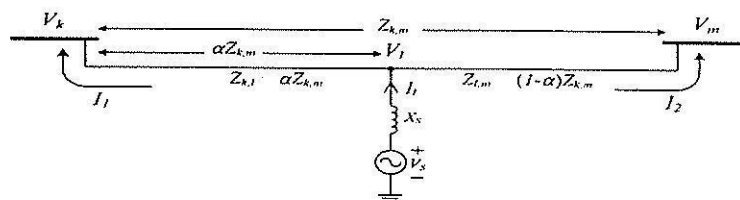
$$V_l = \frac{1}{\beta_1} (V_k - \alpha(V_k - V_m)) \tag{3-46}$$

โดยที่ B_{SVC} คือ ค่าชั้สเซปแดนซ์ของ SVC

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

3.7.3 อุปกรณ์ชดเชย D-STATCOM

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.13 เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยที่ บัส / อยู่ระหว่างบัส k และบัส m ซึ่งเป็นบัสเสริมที่เกิดจากการติดตั้ง D-STATCOM ในระบบเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับรีแอกแตนซ์ ใช้วิธีการแปลงวงจรสมมูลเทวินินเป็นวงจรสมมูลนอร์ตัน ได้ดังรูปที่ 3.14 การกำจัดบัสเสริม / ออกไปเพื่อให้ขนาดของระบบไม่เปลี่ยนแปลงมีหลักการดังนี้

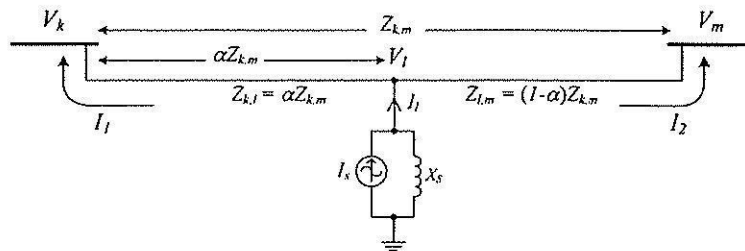


รูปที่ 3.13 บัส / ที่มี D-STATCOM ต่อเชื่อมอยู่

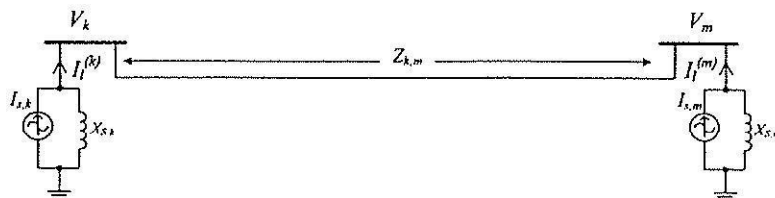
จากรูปที่ 3.14 แบบจำลองของ D-STATCOM ในสภาวะคงตัวเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลนอร์ตันซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับค่ารีแอคแตนซ์และต่อขนานกับบัส l กระแส I_s คำนวณได้จากสมการที่ (3-47) นำเทคนิคการถ่ายโอนโพลที่ได้แสดงวิธีการวิเคราะห์ไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2 มาประยุกต์ใช้โดยทำการวิเคราะห์ 2 ส่วน คือ ประยุกต์ใช้เทคนิคการถ่ายโอนโพลกระแสไฟฟ้าในหัวข้อที่ 3.2.1 เพื่อถ่ายโอนค่ากระแสไฟฟ้าที่ฉีดโดย D-STATCOM และประยุกต์ใช้เทคนิคการถ่ายโอนโพลอิมพีแดนซ์ในหัวข้อที่ 3.2.2 เพื่อถ่ายโอนค่ารีแอคแตนซ์ขนานค่าที่ได้จากการถ่ายโอนไปยังบัสข้างเคียงเขียนในรูปสมการกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่(3-48) และ (3-49) แรงดันไฟฟ้าที่บัส l คำนวณได้จากสมการที่ (3-50)

$$I_s = \frac{V_s}{jX_s} \tag{3.47}$$

- โดยที่ V_s คือ แรงดันของ D-STATCOM
- X_s คือ รีแอคแตนซ์ภายในของ D-STATCOM
- I_s คือ กระแสที่ฉีดโดย D-STATCOM



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลนอร์ตันของ D-STATCOM



รูปที่ 3.15 แบบจำลองการย้าย D-STATCOM จากบัส l มายังบัสข้างเคียง k และ m

$$I_l^{(k)} = (1 - \alpha)(I_s - \beta_2) \quad (3-48)$$

$$I_l^{(m)} = \alpha(I_s - \beta_2) \quad (3-49)$$

$$V_l = jX_s \beta_2 \quad (3-50)$$

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 ลำดับต่อมาได้นำเสนอเทคนิคการถ่ายโอนอุปกรณ์ชดเชยในสภาวะคงตัว 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

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดเพื่อจำกัดข้อจำกัดของตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุทำให้ตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นไปได้ทุกตำแหน่งในระบบไฟฟ้าไม่จำกัดอยู่ที่บัสเท่านั้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังงานสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่หาได้จากการใช้ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (*LSF*) และดัชนีกำลังงานสูญเสีย (*PLI*) ลำดับต่อมาเป็นการค้นหาขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวเก็บประจุซึ่งสามารถหาได้จากการใช้จินเนติกอัลกอริทึม (*GA*) โดยวัตถุประสงค์หลักคือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ดังนี้

4.2 แบบจำลองตัวเก็บประจุ

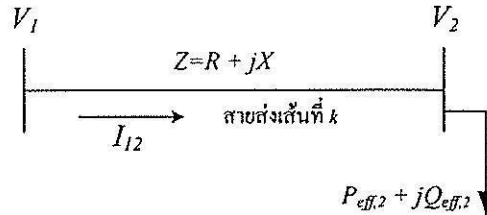
อุปกรณ์ที่ใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายประเภท เช่น ตัวเก็บประจุ *SVC* รีแอกเตอร์ หรือ *D-STATCOM* ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าตัวเก็บประจุถือได้ว่าได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีการลงทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นและง่ายต่อการบำรุงรักษา แต่ปัญหาที่สำคัญคือขนาดและตำแหน่งของตัวเก็บประจุที่จะนำไปติดตั้ง การติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงระดับแรงดันในระบบให้สูงขึ้นทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบลดลงแบบจำลองตัวเก็บประจุที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์มี 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (*reactive power model*) และแบบจำลองซัสเซปแตนซ์ (*susceptance model*)

4.3 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีความไวต่อกำลังงานสูญเสีย

โดยทั่วไปการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเลือกติดตั้งเพียงบางบัสเท่านั้นเนื่องมาจากข้อจำกัดในด้านงบประมาณและความคุ้มค่าในการติดตั้ง งานวิจัยนี้จะนำเสนอดัชนีที่ใช้ระบุตำแหน่งบัสที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว คือ *LSF* และ *PLI* เพื่อช่วยให้ตำแหน่งที่เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุส่งผลดีที่สุดต่อระบบทั้งในเรื่องของระดับแรงดันและกำลังงานสูญเสีย ดังนี้

4.3.1 ตัวประกอบความไวการสูญเสีย *LSF*

ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (Loss Sensitivity Factors: *LSF*) สามารถคำนวณได้จากกำลังงานสูญเสียในสายส่งระหว่างบัส 2 บัสดังรูปที่ 4.1 (Prakash, and Sydulu, 2007)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- V_1, V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2
- $P_{eff,2}$ คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส 2
- $Q_{eff,2}$ คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส 2
- I_{12} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ k
- Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้นที่ k

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเส้นที่ k คำนวณได้จากสมการที่ (4-1)

$$S_{lineloss} = (I_{12})^2 Z \quad (4-1)$$

จากสมการที่ (4-3) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ k คำนวณได้จากสมการที่ (4-2)

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

แทนค่ากระแส I_{12} จากสมการที่ (4-2) ลงในสมการที่ (4-1) จะได้

$$S_{lineloss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} Z \quad (4-3)$$

จากสมการที่ (4-3) กำลังงานสูญเสียในสายส่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ กำลังงานสูญเสียแอกทีฟ ($P_{line\ loss}$) และกำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ ($Q_{line\ loss}$) ดังนี้

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

$$Q_{line\ loss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} X \quad (4-5)$$

จากสมการที่ (4-4) และ (4-5) เขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ (4-6) และ (4-7)

$$P_{line\ loss}[k] = \frac{(P_{eff}[m])^2 + (Q_{eff}[m])^2}{(|V[m]|)^2} R[k] \quad (4-6)$$

$$Q_{line\ loss}[k] = \frac{(P_{eff}[m])^2 + (Q_{eff}[m])^2}{(|V[m]|)^2} X[k] \quad (4-7)$$

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

ตัวประกอบความไวการสูญเสียเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานสูญเสียในสายส่งเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัสนั้น คำนวณได้จากสมการที่ (4-8) และ (4-9)

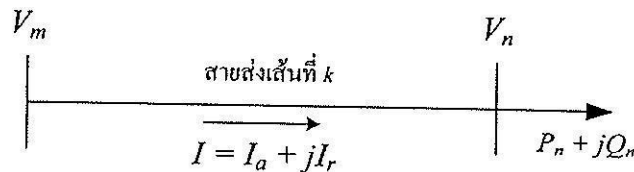
$$\frac{\partial P_{line\ loss}[k]}{\partial Q_{eff}[m]} = \frac{2 \times R[k] \times Q_{eff}[m]}{(|V[m]|)^2} \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial Q_{line\ loss}[k]}{\partial Q_{eff}[m]} = \frac{2 \times X[k] \times Q_{eff}[m]}{(V[m])^2} \quad (4-9)$$

บัสที่มีค่า LSF สูงสุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญเป็นลำดับแรก และบัสที่มีค่า LSF ต่ำที่สุด จะได้รับการจัดอันดับความสำคัญไว้ท้ายสุด

4.3.2 ดัชนีกำลังงานสูญเสีย PLI

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



รูปที่ 4.2 แผนภาพระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเส้นเดียว

ดัชนีที่บัส n สามารถหาได้จาก

$$\text{Index}[n] = \frac{1}{(V[n])^2} + \frac{I_r[k]}{I_a[k]} + \frac{T_{Q\ load}[n]}{\text{Total } Q} \quad (4-10)$$

- โดยที่
- $\text{Index}[n]$ คือ ดัชนีของบัส n
 - $V[n]$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส n
 - $I_r[k]$ คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจินตภาพในสายส่งเส้นที่ k
 - $I_a[k]$ คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจริงในสายส่งเส้นที่ k
 - $T_{Q\ load}[n]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส n
 - $\text{Total } Q$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดในระบบไฟฟ้า

ขนาดของตัวเก็บประจุที่บัส n คำนวณได้จาก

$$\text{Capacitor}[n] = \text{Index}[n] \times Q_{load}[n] \quad (4-11)$$

โดยที่ $Q_{load}[n]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้รแอกทีฟทั้งหมดที่บัส n

สำหรับดัชนี PLI หาได้จากการนำค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้จากสมการที่ (4-11) ไปติดตั้งที่บัสแล้วคำนวณกำลังงานสูญเสียหลังจากการติดตั้งตัวเก็บประจุและคำนวณกำลังงานสูญเสียที่ลดลง ทำเช่นนี้จนครบทุกบัส จากนั้นทำให้กำลังงานสูญเสียที่ลดลงมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 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 นอกจากนี้จะต้องพิจารณาขนาดของแรงดันที่บัสนั้นควบคู่กันไปด้วย โดยการหาค่านอร์มของ $V[i]$ 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

ขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุหาได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับ

เงื่อนไขขอบเขตขนาดของตัวเก็บประจุ โดยกำหนดเงื่อนไขขนาดของตัวเก็บประจุแต่ละตำแหน่ง คัดตั้งไว้ที่ค่าต่ำสุดและสูงสุด คือ $Q_{c,i}^{min} = 200$ kVar และ $Q_{c,i}^{max} = 1200$ kVar ตามลำดับสามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (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 จีแนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น

จีแนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GA) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยมีพื้นฐานมาจากกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (natural selection) และกระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ (natural genetic selection) ซึ่งคิดค้นโดย John Holland เมื่อปี ค.ศ. 1975 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ๆ ดังนี้

1) การรีโพรดักชัน (reproduction)

เนื่องจากโครโมโซมแต่ละชุดมีโอกาสในการอยู่รอดได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นกระบวนการรีโพรดักชันจึงเป็นกระบวนการคัดเลือกโครโมโซมจากกลุ่มประชากรที่มีความเหมาะสมสูงเพื่อนำมาเป็นชุดคำตอบเริ่มต้นให้กับกลุ่มประชากรรุ่นต่อไป โดยอาศัยทฤษฎีการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่เรียกว่า ค่าความฟิต (fitness value) ซึ่งโดยทั่วไปประเมินได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือปริมาณอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2) การครอสโอเวอร์ (crossover)

เป็นขั้นตอนที่ทำภายหลังการรีโพรดักชัน โดยการแลกเปลี่ยนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (parent) ตามอัตราความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (probability of crossover) เพื่อสร้างชุดโครโมโซมรุ่นใหม่หรือโครโมโซมรุ่นลูก (offspring) อัตราการครอสโอเวอร์ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการหาคำตอบของจีแนติกอัลกอริทึม ซึ่งก็คืออัตราส่วนของจำนวนโครโมโซมลูกที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละรุ่นต่อขนาดของประชากร (population size) โดยปกติ จีแนติกอัลกอริทึมจะใช้การครอสโอเวอร์ในสัดส่วนที่สูง ประมาณ 60-70 % ของจำนวนประชากรทั้งหมด

3) การผ่าเหล่า (mutation)

เป็นขั้นตอนที่อาจช่วยให้โครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดีขึ้นหลังจากการครอสโอเวอร์ โดยการปรับเปลี่ยนข้อมูลบางส่วนของโครโมโซมเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ ตามอัตราส่วนความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (probability of mutation) ที่กำหนด อัตราการมิวเตชัน

หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนยีนทั้งหมดในประชากรที่จะเกิดการมิวเตชันขึ้น โดยปกติแล้ว จินเนติกอัลกอริทึมจะยอมให้การผ่าเหล่าเกิดขึ้นได้น้อยมากเพียง 1-2 % เท่านั้น

จินเนติกอัลกอริทึมได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ มากมาย สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการค้นหาคำตอบโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการค้นหาคำตอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและให้ค่า global optimum เมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาด้วยวิธีอื่น ๆ (Zhang, and Tolbert, 2005)

4.4.4 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับ

เทคนิคการถ่ายโอนโหลด

ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปมี 2 ส่วนที่ต้องพิจารณา คือ ตำแหน่งการติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ โดยปัญหาทั้ง 2 ส่วนมักถูกแยกวิเคราะห์ทีละส่วนเพื่อลดตัวแปรที่ต้องค้นหาและประหยัดหน่วยความจำที่ต้องใช้ในระหว่างการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด 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 รัตน์นิยมชัย, 2549)

4.5 ผลการทดสอบ

การทดสอบในบทนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการค้นหาตำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *LSF* ส่วนที่ 2 เป็นการค้นหาตำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *PLI* โดยตำแหน่งที่ได้จากดัชนีทั้ง 2 ตัวไม่จำเป็นต้องเป็นตำแหน่งเดียวกัน และส่วนที่ 3 เป็นการค้นหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งที่เลือกจากดัชนีทั้ง 2 ตัวเปรียบเทียบกับการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยทั้ง 3 ส่วน ทดสอบกับระบบทดสอบ 34 บัส และ 69 บัส เป็นต้น ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะสมดุล ผลเป็นดังนี้

ส่วนที่ 1 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี LSF

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 34 บัสแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 15 อันดับแรก จากตารางที่ 4.1 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

ตารางที่ 4.1 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
17	0.004799	1.01679	0.96595
19	0.004585	1.00858	0.95815
7	0.004414	1.01746	0.96659

ตารางที่ 4.1 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 34 บัส (ต่อ)

Bus No.	$\partial P_{line\ loss} / \partial Q_{eff}$	$V[i]/0.95$	Basecase voltage (p.u.)
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

2) ระบบทดสอบ 69 บัส

ค่านี LSF ของระบบทดสอบ 69 บัสแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 12 อันดับแรก จากตารางที่ 4.2 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 บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 57, 58, 61, 60 และ 59 สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุเพียง 4 บัสเท่านั้น ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 57, 58, 61 และ 60 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 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

ตารางที่ 4.2 ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

Bus No.	$\partial P_{line\ loss} / \partial Q_{eff}$	$V[i]/0.95$	Basecase voltage (p.u.)
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

ส่วนที่ 2 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี PLI

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 34 บัส แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า PLI สูงที่สุด 10 อันดับแรก จากตารางที่ 4.3 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 บัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ 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 4.3 คำนวณ *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

2) ระบบทดสอบ 69 บัส

ค่านี *PLI* ของระบบทดสอบ 69 บัส แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 12 อันดับแรก จากตารางที่ 4.4 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 4.4 คำนวณ *PLI* ของระบบทดสอบ 69 บัส

Bus No.	Power loss after compensation (kW)	Loss reduction (kW)	Power loss index (<i>PLI</i>)	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

ส่วนที่ 3 การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุสามารถทำได้โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึมใน โปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ระบบทดสอบ 34 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาขนาดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อใช้ดัชนี *LSF* เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่าบัสที่ 19, 22 และ 20 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาด 957.88, 861.38 และ 228.69 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 2047.95 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24, 25 และ 23 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 200, 335.98 และ 982.13 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 1518.11 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่า ตัวเก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 19,

9 และระหว่างบัสที่ 25 กับ 26 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 25 เป็นระยะ 0.13 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 25 และ 26 และขนาดของตัวเก็บประจุคือ 949, 806 และ 666 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมดคือ 2421 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย แสดงในตารางที่ 4.6 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 8 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.6 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจรมีขนาดต่ำสุดที่บัส 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 4.7 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 3 ตำแหน่ง แต่วิธี *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LSF* และ *LTT* ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนี *PLI* อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจรมีขนาดใหญ่มากเกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลงขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส ทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 4.7 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

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 34 บัส

<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)
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 4.6 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 34 บัส

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.)
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 4.7 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส

Characteristics/Methods	LSF	PLI	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%

2) ระบบทดสอบ 69 บัส

ระบบทดสอบ 69 บัส เป็นระบบทดสอบ 12.66 kV 100 kVA สำหรับการค้นหาขนาดที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสีย น้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะที่สุดของ ตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.8 เมื่อใช้ดัชนี LSF เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่า บัสที่ 57, 58, 61 และ 60 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมี ขนาด 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 โดยขนาดของตัวเก็บประจุ รวมทั้งหมด คือ 1376.35 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่า ตัว

เก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 61, 21, 8 และระหว่างบัสที่ 11 กับ 12 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 11 เป็นระยะ 0.82 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อบหว่างบัสที่ 11 และ 12 และขนาดของตัวเก็บประจุ คือ 1199.75, 216, 318.25 และ 269.75 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2003.75 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย แสดงในตารางที่ 4.9 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 7 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.9 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 65 คือ 0.90919 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่า บัสที่ 65 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.93098 p.u. ขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้นเมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *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 4.10 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 4 ตำแหน่ง แต่วิธี *LSF* และ *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LTT* ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนีทั้ง 2 อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลง ทำให้ขนาดที่ค้นหาได้จำกัดอยู่ที่ค่าต่ำที่สุด คือ 200 kVar ถึง 3 ตำแหน่ง ขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส ทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 4.10 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

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 69 บัส

<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)
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 4.9 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 69 บัส

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.)
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 4.10 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส

Characteristics/Methods	LSF	PLI	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%

4.6 สรุป

การเลือกตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจะช่วยให้แรงดันในระบบมีค่าสูงขึ้นพร้อมทั้งทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบมีค่าลดลง สำหรับการเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาจากค่า LSF ทำได้โดยการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งบัสที่มีค่า LSF สูง และมีแรงดันต่ำหรืออาจเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งบัสที่มีค่า PLI สูง ๆ ก็ได้ นอกจากนี้การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุสามารถทำได้พร้อม ๆ กัน โดยการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด ผลการทดสอบพบว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้าทำให้แรงดันโดยรวมมีค่ามากขึ้นและกำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่หาโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบลดลงมากที่สุด

บทที่ 5

ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM ที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

5.1 บทนำ

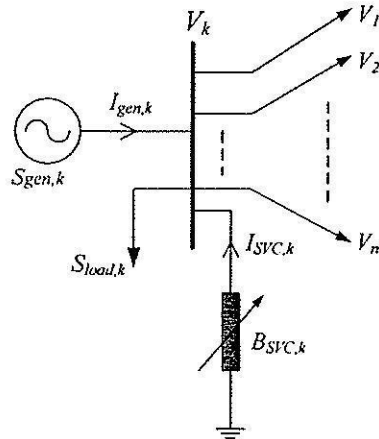
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดร่วมกับจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า 2 ชนิด คือ SVC และ D-STATCOM โดยพิจารณาจากค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าในระบบ หาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในการชดเชยในสถานะโหลดปกติ และสถานะโหลดหนัก ดังนี้

5.2 แบบจำลอง SVC

อุปกรณ์ชดเชย SVC ในรูปที่ 5.1 จะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าชัสมหาอุปทานซ์ปรับค่าได้ โดยสามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในตัวเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นกับการปรับตั้งของผู้ดูแลระบบ สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อชดกำลังงานสูญเสียในสถานะโหลดปกติและสถานะโหลดหนัก กรณีที่ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบค่าชัสมหาอุปทานซ์คำนวณได้จากสมการที่ (5-1) และกรณีที่ SVC รับกำลังไฟฟ้าจากระบบค่าชัสมหาอุปทานซ์คำนวณได้จากสมการที่ (5-2)

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

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



รูปที่ 5.1 ตัวชดเชยค่ารีแอกแตนซ์แบบปรับค่าได้ของ SVC ที่บัส k ใด ๆ

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

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

5.3 แบบจำลอง D-STATCOM

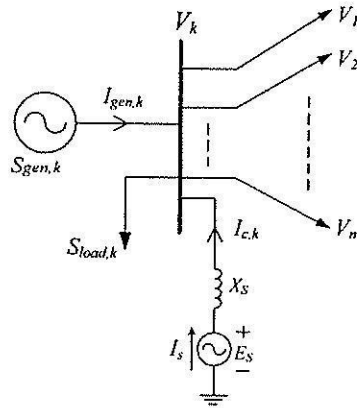
แบบจำลองอุปกรณ์ชดเชย D-STATCOM ในสภาวะคงตัวถูกเขียนแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับรีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM ดังรูปที่ 5.2 สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด แบบจำลอง D-STATCOM ในสภาวะคงตัวจะถูกเขียนแทนด้วยวงจรมูลนอร์ตันซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับค่ารีแอกแตนซ์ โดยกระแสที่ฉีดโดย D-STATCOM คำนวณได้ดังนี้

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

โดยที่ E_s คือ แรงดันของ D-STATCOM

X_s คือ รีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM

I_s คือ กระแสที่ฉีดโดย D-STATCOM



รูปที่ 5.2 แบบจำลอง D-STATCOM ในสภาวะคงตัวที่บัส k ใด ๆ

5.4 ผลการทดสอบ

ทำการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์ชดเชยที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงมากที่สุด ตัวอย่างการทำการศึกษาคือ 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 หาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกรณีโหลดปกติที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด

กรณีที่ 2 หาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกรณีโหลด 1.5 เท่าของสภาวะโหลดปกติที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด

เช่นการทดสอบกับระบบทดสอบ 1 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 34 บัส ข้อมูลของระบบ การคำนวณขอบเขตของตัวแปรที่จะค้นหา ทำได้ดังนี้

กรณี SVC กำหนดให้มีค่ากักเป็น ± 5000 kVar ดังนั้นจะได้ว่า

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

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

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 ค่าชั้สเชปแดนซ์ของ 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)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & P_{loss} = I^2 R \\ \text{subject to} \quad & E_{s,min} \leq E_s \leq E_{s,max} \quad \text{p.u.} \\ & X_{s,min} \leq X_s \leq X_{s,max} \quad \Omega \end{aligned} \quad (5.10)$$

โดยที่ E_s คือ แรงดันของ D-STATCOM

X_s คือ รีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM

การค้นหาค่าแห่งดัดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยสามารถทำได้โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหนดโดยใช้ฟังก์ชันค่าเหมาะสมที่สุด คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ตัวแปรที่สำคัญและค่าของตัวแปรที่เลือกใช้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของเงินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

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

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ระบบทดสอบ 34 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสีย น้อยที่สุด โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของ SVC และ D-STATCOM กรณี โหลดปกติ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM

ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณี โหลดปกติ

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 จะได้ผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.3 ในสถานะโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 27 ขนาด 0.94169 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 6 บัส กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 221.7235 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 21 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 19.5113 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.3 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 โดยคิดเป็น

ร้อยละ 21.8 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 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 5.3 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.97644 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 96.4013 kW คิดเป็นร้อยละ 56.5 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด

ตารางที่ 5.3 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ
เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บัส	ขนาดแรงดันบัส (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

ตารางที่ 5.3 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ
เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM(ต่อ)

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
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

การค้นหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 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 5.5 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 5.5 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 $|E_r|$ เท่ากับ 1.0473 p.u. และ X_r เท่ากับ 2.0000 Ω โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.5 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.96532 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 220.5497 kW คิดเป็นร้อยละ 58.0 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด

ตารางที่ 5.5 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ 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

ตารางที่ 5.5 แรงดันบั๊ตและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บั๊ต กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM(ต่อ)

บั๊ต	ขนาดแรงดันบั๊ต (p.u.)		
	ระบบปกติ (1.5 เท่าโหลด)	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
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

5.5 สรุป

จุดประสงค์หลักของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM เข้าในระบบไฟฟ้าก็เพื่อช่วยป้องกันกลุ่ม โหลดจากความผิดปกติต่าง ๆ รวมถึงแรงดันตกในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้เหมือนหรือใกล้เคียงกับสภาวะปกติมากที่สุด เนื้อหาบทนี้เป็นการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุดในกรณีที่ระบบจ่ายโหลดปกติและกรณีจ่ายโหลดหนัก ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด จากผลการทดสอบพบว่า ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่ได้จากการค้นหาทำให้แรงดันไฟฟ้าโดยรวมของระบบสูงขึ้น กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าลดลง

บทที่ 6

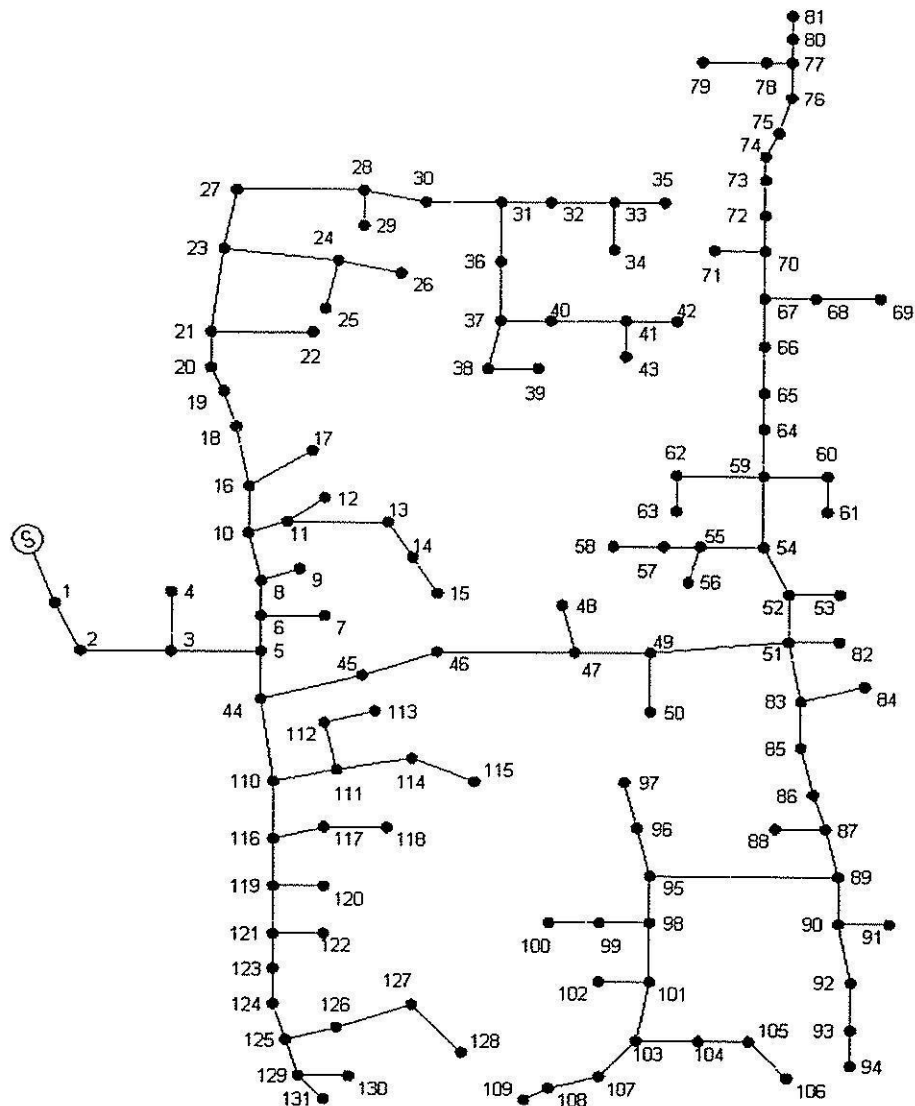
การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV

6.1 บทนำ

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

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 เดินสายไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ผ่านถนนมิตรภาพรวมระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร ลากสายไฟทางทิศใต้เข้าสู่การเคหะจากนั้นสายจ่ายจะแยกออกเป็น 2 ทาง ทางที่หนึ่งลากสายไปทางทิศใต้และสิ้นสุดที่กองบิน 1 ทางที่สองลากสายไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ตามถนนสีบสรีและซอยรางน้ำ จนกระทั่งสิ้นสุดที่ถนนพิบูลสงคราม วงจรนี้มีบัสทั้งสิ้น 131 บัส มีโหลดทั้งสิ้น 57 โหลด รวมทั้งสิ้น 3479.592 kW และ 1925.211 kVar ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของสถานี นครราชสีมา 2 (วงจร 10) แสดงได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV นครราชสีมา 2 (วงจร 10)

6.3 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV

การค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ทำได้โดยการพิจารณาจากค่าตัวประกอบกำลังงานสูญเสีย (*LSF*) และดัชนีกำลังงานสูญเสีย (*PLI*) ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในบทที่ 4 ส่วนการหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุทำได้โดยการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม โดยมีวัตถุประสงค์ คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และการเลือกตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหนดร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม 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 แรงดันที่ส่งจากสถานีไฟฟ้าที่มีค่า 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

ขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุหาได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตขนาดของตัวเก็บประจุ สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาที่เหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (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

สำหรับการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโพลด จะดำเนินการไปพร้อม ๆ กัน โดยการเลือกตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยพิจารณาจากค่ากำลังงานสูญเสียรวมทั้งหมดของระบบ ถ้าตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เลือกทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าต่ำที่สุด ตำแหน่งและขนาดดังกล่าวจะเป็นจุดคำตอบของปัญหา สำหรับกรณีศึกษา (วงจร 10) ในการจำลองผลเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ กำหนดเงื่อนไขขนาดของตัวเก็บประจุแต่ละตำแหน่งติดตั้งไว้ที่ค่าต่ำสุดและสูงสุดคือ 100 kVar และ 1200 kVar ตามลำดับ

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 เปรียบเทียบกับการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

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 จะไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ 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 เมื่อพิจารณาค่า LSF สูงที่สุด 28 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ 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

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 ดัชนี *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

ตารางที่ 6.2 คำนวณ *PLI* ของระบบทดสอบ 131 บัส(ต่อ)

Bus No	Power loss after compensation (kW)	Loss reduction (kW)	Power loss index (<i>PLI</i>)	Capacitor size (kVar)
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

ส่วนที่ 3 การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

ระบบทดสอบ 131 บัส เป็นระบบทดสอบ 22 kV 100 kVA การค้นหาขนาดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวเก็บประจุผลที่ได้แสดงในตารางที่ 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 และขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 1825.25 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 127, 68, 78, 79, 117 และ 112 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 355, 257, 165, 252, 409 และ 476 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 1914.00 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอน โหลด

(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 และ ติดตั้งระหว่างบัสที่ 31 กับ 36 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 31 เป็นระยะ 0.67 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 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

สถานะโหลดปกติ

<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		LTT		
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

ตารางที่ 6.3 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 131 บัส

สถานะ โหลดปกติ(ต่อ)

<i>LSF</i>		<i>PLI</i>		LTT		
Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	Capacitor size (kVar)	Bus no.	α	Capacitor size (kVar)
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

สถานะ โหลดปกติ

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.)
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%

6.5 สรุป

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

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อถ่ายโอนโหลดในรูปแบบต่าง 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 งานวิจัยนี้เสนอวิธีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดและการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นในการจำลองผลในกรณีต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการจ่ายโหลดอย่างสมดุล สำหรับการหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อลดตัวแปรที่ต้องค้นหาในระหว่างการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด การเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าอาจเลือกจากดัชนี *LSF* หรือดัชนี *PLI* ขนาดของตัวเก็บประจุหาโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม งานวิจัยนี้เสนอการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดจำลองผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

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

สม่าเสมออาจกล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการถ่ายโอน โหลดมีความสัมพันธ์กับตัวแปรค่าหนึ่ง ในงานวิจัยนี้แทนด้วยตัวแปร α มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ขึ้นกับตำแหน่งติดตั้งของโหลด จากนั้นเป็นการพัฒนาเทคนิคการถ่ายโอน โหลดอิมพีแดนซ์และโหลดกำลัง ไฟฟ้า ลำดับต่อมาเป็นการพัฒนา โปรแกรมคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลและวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด ประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอโดยทดสอบกับระบบทดสอบ 4 ระบบ ทดสอบ ได้แก่ ระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส และ 85 บัส โดยระบบทดสอบทั้งหมดเป็น ระบบทดสอบแบบสมดุค จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคล ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลด จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง ตำแหน่งการเพิ่ม โหลดมีผลน้อยมากต่ออัตราการเข้าสู่ของผลเฉลย เมื่อเพิ่มโหลดเข้าในระบบให้มากขึ้นในตำแหน่ง ที่ทำให้เกิดบัสเสริมพบว่าจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลงเมื่อเทียบกับวิธีเกาส์-ไซเคล มาตรฐาน เทคนิคที่นำเสนอช่วยแก้ปัญหาสภาวะเลว (ill-condition) ได้เป็นอย่างดี สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน นำเสนอการนำโหลดที่ได้จากการถ่ายโอน ไปยัง บัสข้างเคียงรวมกับสมการกำลัง ไฟฟ้าไม่สอดคล้องในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่ บัส (S_{sch}) แทนการรวมกับสมการกำลัง ไฟฟ้าไม่สอดคล้องในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ (S_{cal}) ทำให้ขนาดของเมตริกซ์จาโคเบียนไม่เปลี่ยนแปลงช่วยลดความซับซ้อนของ โปรแกรมการคำนวณ จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอน โหลดพบว่า ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีนิวตัน-ราฟสัน มาตรฐาน และเห็นผลชัดเจนมากขึ้นเมื่อจำนวนบัสเสริมในระบบมากขึ้น

2) นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้ ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (LSF) และดัชนีกำลังงานสูญเสีย (PLI) โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่มีแรงดันต่ำและมีค่าดัชนี LSF สูง หรือเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุบัสที่มีค่าดัชนี PLI สูง สำหรับ ขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมหาได้จากเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม และ นำเสนอการค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุ โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิค การถ่ายโอน โหลด (LTT) ซึ่งช่วยกำจัดข้อจำกัดของตำแหน่ง ในการติดตั้งของวิธีการค้นหาใน ปัจจุบันที่จำกัดอยู่ที่บัสเท่านั้น ทำให้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุในระหว่างการจำลองผลอยู่ที่ ตำแหน่งใดก็ได้ในระบบ โปรแกรมการจำลองผลมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จากผลการทดสอบโดย กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้า ทำให้แรงดันมีค่าสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียน้อยลง ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ ได้จากเทคนิค LTT ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งและขนาดของตัว เก็บประจุที่ได้จากดัชนี LSF และดัชนี PLI

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

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

7.2 ข้อเสนอแนะ

1) การกำหนดขนาดตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นการสวิตช์แบบอุดมคติ ทำให้ขนาดตัวเก็บประจุที่ได้จากการจำลองผลมีค่าละเอียดมากเกินไปซึ่งอาจต่างจากความเป็นจริงที่การสวิตช์ตัวเก็บประจุเป็นแบบขั้นบันไดและเป็นไปไม่ได้ทุกค่า ดังนั้นเพื่อให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงอาจกำหนดการสวิตช์เป็นแบบขั้นบันไดแทนการสวิตช์แบบอุดมคติ

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

3) การหาค่าเหมาะที่สุดของตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ D-STATCOM และ SVC โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหนดต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเมื่อระบบทดสอบมีขนาดใหญ่ ทำให้การหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมไม่เหมาะกับระบบที่ต้องการความเร็วในการค้นหา ทั้งนี้อาจเลือกวิธีการค้นหาอื่นที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันแต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาประยุกต์ใช้ เช่น การโปรแกรมวิวัฒนาการหรือการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค เป็นต้น

- 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 Reserch**. 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.

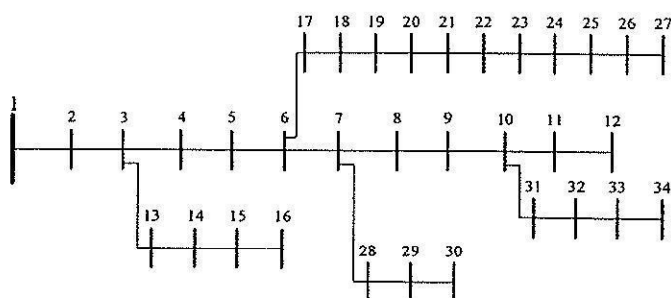
ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ

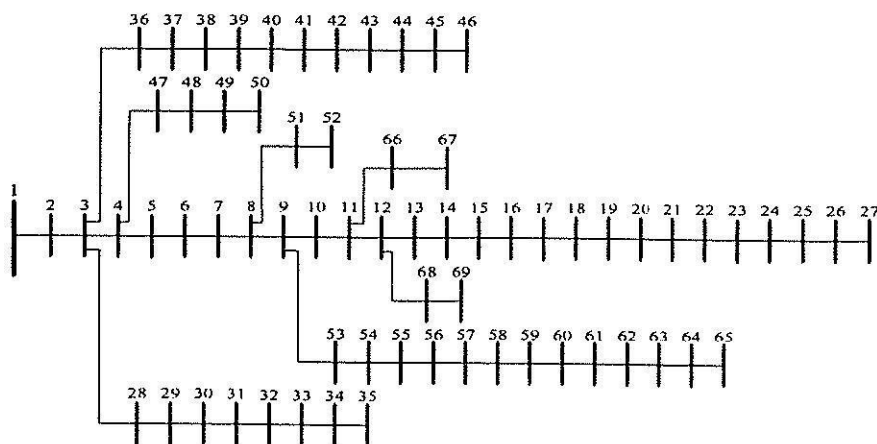
ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 3 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 34 บัส และ 69 บัส และ ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ระบบทดสอบทุกระบบมีค่าฐานเท่ากับ 100 kVA รายละเอียดของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

ก.1 ระบบทดสอบ 34 บัส



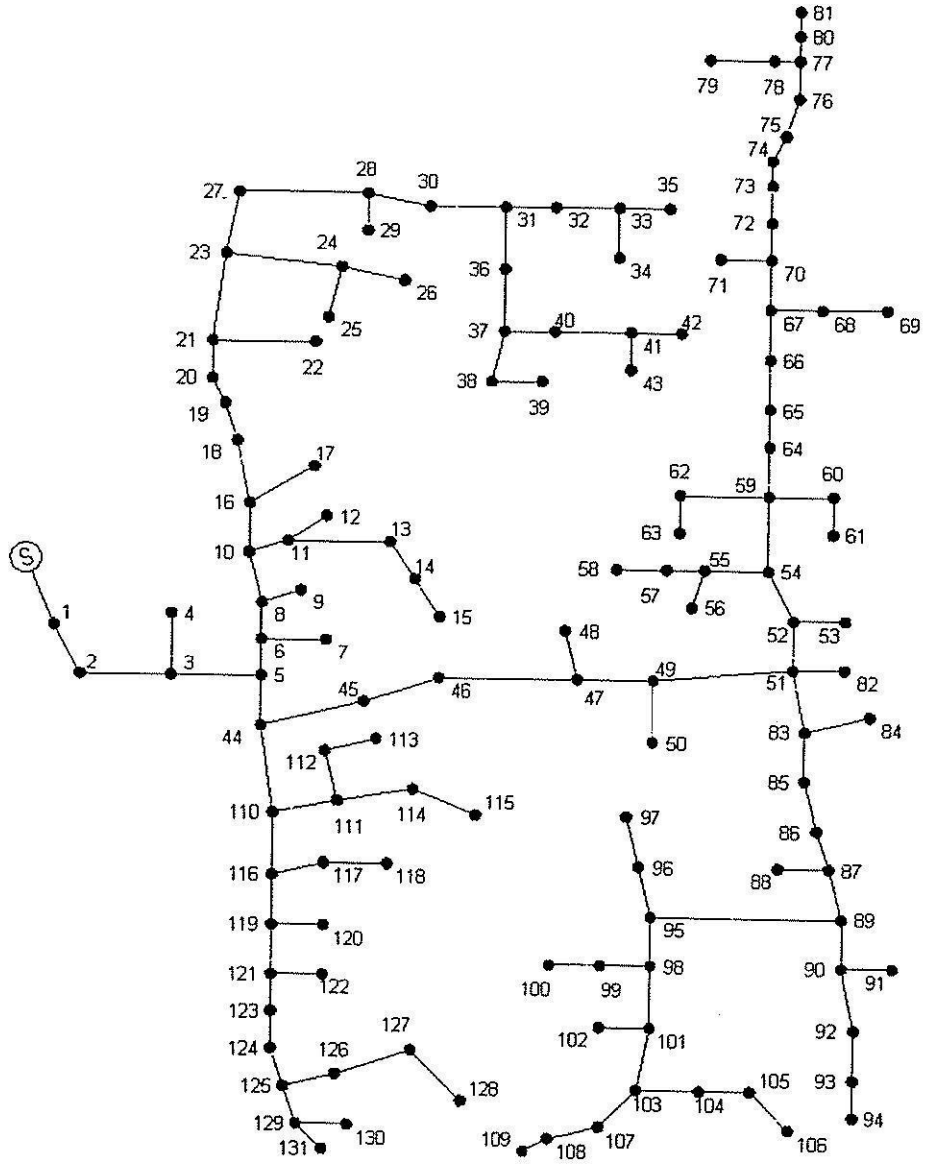
รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 34 บัส

ก.2 ระบบทดสอบ 69 บัส



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 69 บัส

ก.3 ระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ 131 บัส

ภาคผนวก ข
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว รีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี 25-26 ตุลาคม 2550 หน้า 22-232.
2. “เทคนิคการถ่ายโอนโหลดสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า”. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาม.ทส. ครั้งที่ 1 ณ สุรสัมมนาการ 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.

ภาคผนวก ค

ประวัตินักวิจัย

ชนิดชัย กุลรวรานิชพงษ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ด้วยเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2540 ด้วยทุนส่งเสริมผู้มีความสามารถเป็นอาจารย์มหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย ต่อมาได้รับทุนพัฒนาอาจารย์จากทบวงมหาวิทยาลัยเพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาโท และในปี พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้น ได้รับทุนจากสำนักงานแผนและนโยบายพลังงาน กระทรวงพลังงาน เพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาเอก และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกทางด้านไฟฟ้ากำลังและระบบควบคุมสำหรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงระยะไกล จากมหาวิทยาลัยแห่งเบอร์มิงแฮม ประเทศอังกฤษ ในปี พ.ศ. 2546 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้ทำการศึกษาและดำเนินงานวิจัยทางการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุม การหาค่าเหมาะที่สุด และปัญญาประดิษฐ์ อย่างต่อเนื่อง