

แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าและการหาค่าเหมาะที่สุด
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นายประมวล แสงสารวัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

**POWER FLOW MODELING AND OPTIMIZATION
OF INDUCTION GENERATORS**

Pramual Sangsarawut

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าและการหาค่าเหมาะที่สุด
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานำฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ชนัดชัช กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประมวล แสงสารวัตร : แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าและการหาค่าเหมาะที่สุดของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (POWER FLOW MODELING AND OPTIMIZATION
OF INDUCTION GENERATORS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์,
174 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้า
และการหาค่าเหมาะที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงาน
ในสถานะคงตัว ในรูปของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการ
ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเสนอกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองชนิด ได้แก่
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน
ซึ่งกล่าวถึงแบบจำลองสองแบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้าและแบบจำลองแอดมิตแตนซ์
การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะการทำงานในสถานะคงตัว สามารถทำได้โดยการ
คำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ วิเคราะห์ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยการ
คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เขียนโปรแกรมโดยใช้ MATLAB ระบบทดสอบ 15 บิต 34 บิต
69 บิต 85 บิต และระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บิต ถูกนำมาใช้เพื่อ
ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่นำเสนอ การกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาจากบัสที่อ่อนแอที่สุดโดยการประเมินด้วยดัชนีเสถียรภาพแรงดัน
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เมื่อหาตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้แล้ว ขนาดของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม ดำเนินการโดยการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข
บังคับ โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำ จากผลการทดสอบ พบว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบจำหน่าย
กำลังไฟฟ้าช่วยปรับปรุงคุณลักษณะแรงดัน ประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพแรงดัน
และกำลังงานสูญเสียของระบบ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PRAMUAL SANGSARAWUT : POWER FLOW MODELING AND
OPTIMIZATION OF INDUCTION GENERATORS. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 174 PP.

SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR/DOUBLY-FED INDUCTION
GENERATOR/POWER MODEL/ADMITTANCE MODEL

This thesis presents study and development of power flow modeling and optimization of induction generators. These models are used for steady-state power flow calculation in power distribution systems in which the induction generators are connected to serve load. In general, induction generators can be categorized into two types: (i) Self-Excited Induction Generator (SEIG) and (ii) Doubly-Fed Induction Generator (DFIG). Each type is also represented mathematically by two proposed models of power (PQ) and admittance (Y). The simulation frame work was developed under MATLAB programming environment. The developed models were used in association with steady-state power flow calculation based on the well-known Newton-Raphson iterative method to characterize effects of induction generators on electrical power network. To evaluate the effectiveness of the proposed models, 15-bus, 34-bus, 69-bus, 85-bus test feeders and the 10th feeder of Nakhon Ratchasima 2 substation were used as the test systems. Problems of optimal location of induction generators were considered in this thesis. Voltage stability index was applied to identify the weakest bus of the systems. The weakest bus was one of optimal locations to install the induction generator. Also, after locating the site of the induction generator to be installed, the next step is to find the optimal rating of the generator. This problem can be formulated as a constrained optimization problem and be solved

by genetic algorithms. Simulation results showed that installing the induction generators in the electric power distribution system can improve voltage profile, transmission efficiency, voltage stability and power loss reduction.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลวรรณานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

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

ประมวล แสงสารวัตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๓

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเรื่อง.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	5
2.3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า.....	6
2.3.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล.....	6
2.3.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	12
2.4.ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power distribution systems)	19
2.5.การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power compensation).....	21
2.6.กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด (loss minimization).....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (voltage stability in powerdistribution systems)	24
2.8 สรุป.....	25
3 แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	26
3.1 บทนำ	26
3.2 แบบจำลองในสถานะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง	26
3.2.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model)	26
3.2.2 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (Admittance model)	30
3.3 แบบจำลองในสถานะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน	31
3.3.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model)	31
3.4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	34
3.4.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model)	34
3.4.1.1 พิจารณาค่าสลิปของ SEIG เป็นค่าคงที่	35
3.4.1.2 พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG เป็นค่าคงที่	39
3.4.2 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (Admittance model)	42
3.5 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	44
3.5.1 พิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่	45
3.5.2 พิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่	49
3.6 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	51
3.6.1 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	51
3.6.2 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	59
3.7 สรุป.....	68
4 ตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	70
4.1 บทนำ	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอโดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า	70
4.2.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว FVSI.....	71
4.3 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม	74
4.3.1 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม.....	74
4.3.2 เงินเนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น	75
4.4 ผลทดสอบ.....	76
4.5 สรุป.....	99
5 ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	101
5.1 บทนำ	101
5.2 การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม	101
5.2.1 การหาตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	101
5.2.2 การหาขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	102
5.3 ผลการทดสอบ.....	103
5.4 สรุป.....	121
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	122
6.1 สรุป.....	122
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	124
รายการอ้างอิง	125
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ระบบทดสอบ.....	128
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	159
ประวัติผู้เขียน.....	174

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง..... 51
3.2	ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน..... 59
4.1	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัส 78
4.2	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัส 79
4.3	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัส 81
4.4	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัส 83
4.5	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัส 85
4.6	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 15 บัส..... 87
4.7	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 15 บัส 87
4.8	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 34 บัส..... 88
4.9	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 34 บัส 88
4.10	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 69 บัส..... 89
4.11	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 69 บัส 89
4.12	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 85 บัส..... 90
4.13	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 85 บัส 90
4.14	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 131 บัส..... 91
4.15	บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 131 บัส 91
4.16	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG 93
4.17	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG..... 93
4.18	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG 94
4.19	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG..... 95
4.20	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG 96
4.21	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG..... 96
4.22	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG 97
4.23	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG..... 98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.24	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG 99
4.25	บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG..... 99
5.1	ค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB 104
ก.1	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 15 บัส..... 129
ก.2	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 15 บัส 130
ก.3	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 34 บัส..... 131
ก.4	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 34 บัส 133
ก.5	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 69 บัส..... 135
ก.6	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส 137
ก.7	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 85 บัส..... 141
ก.8	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส 144
ก.9	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส..... 149
ก.10	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส 154

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่อกับบัสอื่น 7
2.2	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล 12
2.3	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน..... 19
2.4	ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 บัส..... 20
2.5	แบบแผนพื้นฐาน ไทริสเตอร์ของตัวควบคุม FACTS..... 22
3.1	วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง 27
3.2	แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง 30
3.3	วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน 31
3.4	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปเป็นค่าคงที่ 38
3.5	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าจริงเป็นค่าคงที่ 41
3.6	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ 43
3.7	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน เมื่อพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่..... 48
3.8	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ 50
3.9	ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส 52
3.10	การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส 53
3.11	ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส 54
3.12	การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส 54
3.13	ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส 55
3.14	การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส 56
3.15	ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส	57
3.17 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส	58
3.18 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส	59
3.19 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส	61
3.20 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส	61
3.21 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส	62
3.22 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส	63
3.23 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส	64
3.24 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส	64
3.25 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส	66
3.26 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส	66
3.27 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส	67
3.28 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส	68
4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส	71
4.2 วัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึม	76
4.3 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัส	77
4.4 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัส	78
4.5 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัส	80
4.6 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัส	80
4.7 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัส	82
4.8 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัส	82
4.9 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัส	84
4.10 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัส	84
4.11 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัส	86
4.12 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัส	86
5.1 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 13 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 15 บัส	105
5.3 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 15 บัส	106
5.4 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 27 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 34 บัส	107
5.5 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 34 บัส	107
5.6 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 65 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 69 บัส	108
5.7 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 69 บัส	109
5.8 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 54 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 85 บัส	110
5.9 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 85 บัส	110
5.10 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 128 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 131 บัส	111
5.11 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 131 บัส	112
5.12 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 13 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 15 บัส	113
5.13 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 15 บัส	114
5.14 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 27 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 34 บัส	115

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 การดูเข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 34 บัส	115
5.16 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 65 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 69 บัส	117
5.17 การดูเข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 69 บัส	117
5.18 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 54 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 85 บัส	118
5.19 การดูเข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 85 บัส	119
5.20 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 128 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 131 บัส	120
5.21 การดูเข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ของระบบทดสอบ 131 บัส	120
ก.1 ระบบทดสอบ 15 บัส.....	129
ก.2 ระบบทดสอบ 34 บัส.....	131
ก.3 ระบบทดสอบ 69 บัส.....	134
ก.4 ระบบทดสอบ 85 บัส.....	140
ก.5 ระบบทดสอบ 131 บัส.....	148

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

I_{12}	กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส 1 ไปยังบัส 2
$I_{D,k}$	โหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k
$I_{G,k}$	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k
kV	หน่วยกิโลของแรงดันไฟฟ้า
kVar	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
kVA	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน
kW	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
P	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
$P_{cal,k}$	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
P_D	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลด
P_G	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$P_{k,i}^{DFIG}$	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ DFIG ที่บัส k ตัวที่ i
$P_{k,i}^{SEIG}$	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ SEIG ที่บัส k ตัวที่ i
P_{loss}	กำลังงานสูญเสียแอกทีฟ
$P_{mis,max}$	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
$P_{sch,k}$	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ถูกกำหนดที่บัส k
Q	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
$Q_{cal,k}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
Q_D	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลด
Q_G	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$Q_{k,i}^{DFIG}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ DFIG ที่บัส k ตัวที่ i
$Q_{k,i}^{SEIG}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ SEIG ที่บัส k ตัวที่ i
Q_{loss}	กำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ
$Q_{mis,max}$	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
$Q_{sch,k}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ถูกกำหนดที่บัส k
$S_{D,k}$	กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$S_{G,k}$	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k
S_{loss}	กำลังงานสูญเสีย
$S_{sch,k}$	กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส k
V_k	แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
$V_k^{(h)}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัส k รอบการคำนวณที่ h ใด ๆ
$y_{k,i}$	แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i
Y_{bus}	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
Y_g	แอดมิตแตนซ์รวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$Y_{k,i}$	สมาชิกแถวที่ k หลักที่ i ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
Z	ความต้านทานเชิงซ้อนของสายส่ง
$Z_{D,k}$	โพลดอิมพีแดนซ์ที่บัส k
Z_g	อิมพีแดนซ์รวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
δ_k	มุมของแรงดันที่บัส k
ε_{tol}	ความคลาดเคลื่อนในการหยุด
γ	ตัวประกอบเร่งการลู่เข้า
Ω	หน่วยของความต้านทาน
$ V_k $	ขนาดแรงดันที่บัส k
ΔP_k	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส k
ΔQ_k	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส k
$\Delta \delta$	ผลต่างของมุมแรงดันที่บัส
$\Delta V $	ผลต่างของขนาดแรงดันที่บัส
*	ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน
DFIG	Doubly-Fed Induction Generator
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
FVSI	Fast Voltage Stability Index
GA	Genetic Algorithms
p.u.	per unit system
SEIG	Self-Excited Induction Generator

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม และการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในครัวเรือน ซึ่งมีอยู่ทั่วประเทศจึงส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า เพื่อสนองตอบต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตซึ่งก็คือ โรงจักรไฟฟ้า ไปสู่โหลดในพื้นที่ต่าง ๆ ด้วยข้อจำกัดของแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้า ทำให้โรงจักรไฟฟ้ากับโหลดอยู่ห่างไกลกัน จึงต้องมีการส่งต่อกำลังไฟฟ้าผ่าน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งทำหน้าที่จำหน่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อจ่ายไฟให้กับผู้บริโภคในท้องถิ่นหลักที่รับผิดชอบ และเชื่อมถึงกันด้วยสายส่งจึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้อย่างเพียงพอ ด้วยเหตุนี้กำลังไฟฟ้าจึงสามารถไหลไปสู่โหลดได้ทั่วทั้งระบบไฟฟ้าที่มีการต่อเชื่อมถึงกัน ขึ้นอยู่กับการควบคุมทิศทาง การไหลของกำลังไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (power distribution system) เป็นระบบที่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power transmission system) เพื่อจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟที่กระจายอยู่ในบริเวณต่าง ๆ โดยแรงดันของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายระดับ เช่น 11 kV 12 kV 22 kV 24 kV และ 33 kV เมื่อเดินสายจำหน่ายมาถึงที่บริเวณที่มีผู้ใช้ไฟ จะลดระดับแรงดันของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้ต่ำลงอยู่ในระดับที่ใช้งานกันคือ 380/220 V ปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV คือแรงดันตก (voltage drop) ที่ปลายทางหรือจุดโหลด อันเนื่องมาจากแรงดันตกในสายป้อน 22 kV ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟ นอกจากนี้เสถียรภาพแรงดันในระบบจะลดลง เมื่อมีการใช้โหลดที่มีขนาดมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันในระบบลดลง ปัจจุบันได้มีการแสวงหาแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อรักษาระดับแรงดันโหลดให้มีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ ในทุก ๆ สภาวะโหลด โดยการติดตั้งตัวชดเชยเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า อาจจะเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor bank) หรือตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (dynamic voltage restorer) เป็นต้น และอีกหนึ่งวิธีคือ การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายเข้าไปในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (distributed generators) คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยปกติขนาดน้อยกว่า 15 MW ซึ่งส่วนใหญ่ใช้กังหันลม (wind turbines) หรือกังหันน้ำขนาดเล็ก

(small-scale hydraulic turbines) เป็นตัวต้นกำลัง ที่ถูกติดตั้งเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปยังระบบ โดยส่งผลให้เกิดข้อดี คือช่วยลดต้นทุนการนำเข้าพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายส่วนใหญ่มาจากแหล่งพลังงานที่ไม่หมดสิ้น ผลจากการติดตั้งนี้ย่อมทำให้จุดการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า การกระจายของขนาดแรงดันตลอดระยะความยาวของสายป้อน หรือกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งระบบ เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าและการหาค่าเหมาะที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบ เนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ต้องผ่านการวิเคราะห์ความมั่นคงในระบบอย่างรอบคอบเพื่อให้การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังกล่าว ช่วยทำให้ความเชื่อถือได้ในระบบเพิ่มสูงขึ้น (high reliability) ระดับแรงดันในระบบดีขึ้น (voltage profile improvement) และกำลังงานสูญเสียทั้งระบบลดน้อยลง (reduction of power loss) โดยปัญหาที่สำคัญสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้แก่ การเลือกตำแหน่งติดตั้งและการกำหนดขนาดหรือพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม (optimal location and sizing) วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม โดยพิจารณาสองกรณี กรณีแรกพิจารณาค่าตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด ในรูปของการประเมินบัสอ่อนแอ โดยใช้การคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว (fast voltage stability index: FVSI) (Musirin and Abdul Rahman, 2002) โดยบัสใดก็ตามที่ทำให้ค่าดัชนีเสถียรภาพแรงดันดังกล่าวเท่ากับหรือใกล้เคียงค่า 1.00 และมีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดต่ำที่สุด หมายถึง การมีโอกาสหรือความเสี่ยงสูงต่อการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดไฟดับทั้งระบบ (system blackout) กรณีที่สองพิจารณาค่าตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยอาศัยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม จากนั้นทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาค่าตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ระหว่างบัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกติดตั้งโดยต่อเข้ากับบัสที่ได้รับการประเมินว่าเป็นตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการค้นหาค่าขนาดติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ผลการดำเนินงานดังกล่าวจะช่วยทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำงานอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยมีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้สูง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัว
- เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้งาน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะคงตัว
- ทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสายป้อนสมดุลในสถานะการจ่ายโหลดสมดุล
- ศึกษาแบบจำลอง 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ไม่พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง และชนิดจ่ายสองด้าน
- วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสำหรับระบบที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- ทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นครราชสีมา และระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง และชนิดจ่ายสองด้าน สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า
- ได้แนวทางใหม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่ง่ายยิ่งขึ้น
- ได้โปรแกรมจำลองผลโดยใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นใหม่และมีคุณภาพยิ่งขึ้น
- ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 2 ภาคผนวก **บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองในสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบจำลองกำลังไฟฟ้าและแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองในสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมทั้งผลทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า การค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดโดยอาศัยดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยอาศัยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม รวมทั้งผลทดสอบการหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด ผลทดสอบการหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และผลทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างบัสที่อ่อนแอที่สุดกับบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดเพื่อหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

บทที่ 5 กล่าวถึงขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสมร่วมกับเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมภายใต้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด รวมทั้งผลทดสอบการหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

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

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุดสิ่งหนึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นและเป็นเครื่องมือพื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเรื่องอื่น ๆ เช่น การคำนวณความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง การพิจารณาแรงดันตก การพิจารณาเรื่องฮาร์มอนิก รวมถึงการวางแผนการจ่ายโหลดไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าตามสถานที่ต่าง ๆ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามีจุดมุ่งหมายเพื่อหาคุณลักษณะการทำงานในสภาวะคงตัวของระบบไฟฟ้ากำลัง ผลที่ได้ประกอบด้วยขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสต่าง ๆ รวมไปถึงกำลังงานสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล และนิวตัน-ราฟสัน ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเบื้องต้นเกี่ยวกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์และจำลองการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย โดยย่อ ได้ดังนี้ (Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, and Xianzhong Duan, 2006) ได้อธิบายถึง ผลของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยสรุปว่า การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ด้วยขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม จะช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ เนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย สามารถติดตั้งให้อยู่ใกล้กับโหลดมากที่สุดได้ และไม่ต้องการสายส่งและระบบส่งจ่ายมากนัก โดยข้อดีของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบ มีดังต่อไปนี้ ลดกำลังงานสูญเสียในสายส่ง ระดับแรงดันในระบบดีขึ้น ความเชื่อถือได้ในระบบสูงขึ้น และคุณภาพของกำลังไฟฟ้าดีขึ้น ส่วนงานวิจัยของ

(M. Mardaneh and G.B. Gharehpetian, 2004) อธิบายว่า ปรากฏการณ์ของแรงดันในระบบขาดเสถียรภาพ อาจเกิดขึ้นได้ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโหลด การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สามารถช่วยให้เสถียรภาพแรงดันในระบบดีขึ้น ซึ่งเสถียรภาพของแรงดันเป็นเงื่อนไขสำคัญของการวางแผนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่วนงานวิจัยของ (W. Zhiquan, Z. Shouzhen, and Z. Shuangxi, 2004) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า พบว่าเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้กำลังงานสูญเสียในสายส่งลดลง ระดับแรงดันในระบบสูงขึ้น และส่งผลให้ความเชื่อถือได้ในระบบเพิ่มมากขึ้นด้วย งานวิจัยของ (D. Chattopadhyay, K. Bhattacharya, and J. Parikh, 1995) ได้ศึกษาการวิเคราะห์และ การวางแผนการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า พบว่าการแก้ปัญหาการวางแผนการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม จะช่วยยกระดับแรงดันในระบบให้สูงขึ้น และช่วยลดกำลังงานสูญเสียในสายส่งให้น้อยลง ส่งผลให้ความเชื่อถือได้ในระบบเพิ่มมากขึ้น

2.3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า หรือที่รู้จักกันในชื่อ power flow ซึ่งรูปแบบของปัญหาจะเป็นการหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในแต่ละสายส่ง ตลอดจนการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่ง ซึ่งแต่ละบัสมีค่าที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

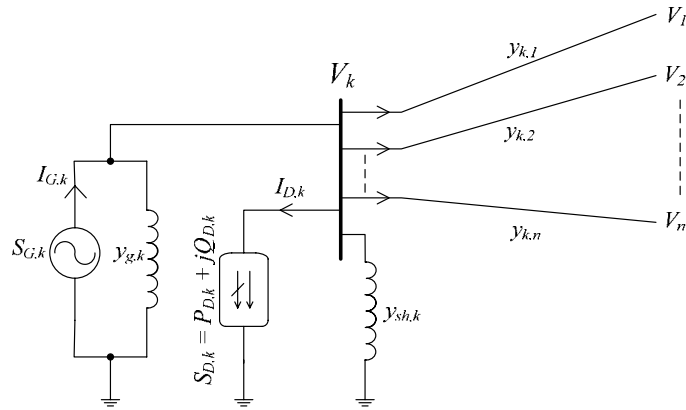
Slack bus หรือ swing bus เป็นบัสที่ค่า $|V|$ และ δ คงที่ ($|V|$ and δ are specified) ส่วน P และ Q เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

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

2.3.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

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



รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น

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

$$y_{k,1}(V_k - V_1) + y_{k,2}(V_k - V_2) + \dots + y_{k,n}(V_k - V_n) = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2.1)$$

โดยที่ $I = yV$ จะได้

$$I_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}(V_k - V_i) = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2.2)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}(V_k - V_i) = \left(\frac{S_{G,k} - S_{D,k}}{V_k} \right)^* \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (2.4)

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}(V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* \quad (2.4)$$

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

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

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* = (S_{sch})^* \quad (2.5)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{sch,k}}{V_k} \right)^* = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.6)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_k - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.7)$$

จากการคำนวณหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

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

จัดรูปสมการที่ (2.7) โดยใช้ตัวแปรเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ จะได้ว่า

$$Y_{k,k} V_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.8) จะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (2.10)

$$V_k = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i \right\} \quad (2.10)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{(h)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h-1)})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i^{(h-1)} \right\} \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) เป็นการปรับปรุงตามระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์ สำหรับระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเคลนั้น จะอาศัยหลักการในรอบการคำนวณใด ๆ จะดำเนินการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าจากบัสที่ 1 จนถึงบัสที่ n (ไม่รวมบัสอ้างอิง) โดยเรียงลำดับการปรับปรุงจาก 1 ไปถึง n ดังนั้น ในการคำนวณในรอบที่ $h+1$ ใด ๆ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงแรงดันที่บัส k จะพบว่าแรงดันบัสที่ 1 ถึงบัสที่ $k-1$ ได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่ได้รับการปรับปรุงของบัสที่ 1 ถึง $k-1$ (ใช้ค่าการคำนวณรอบที่ $h+1$) ในการคำนวณ ในขณะที่แรงดันบัสของบัสที่ k ถึง n ยังคงเป็นค่าที่ได้จากรอบการคำนวณก่อนหน้า (h) นั้นเอง ดังนั้นจะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเคลดังสมการที่ (2.12)

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีการกำหนดบัสสแลก เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วยและไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัสเท่านั้น

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

$$V_{k,acc}^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2.13)$$

$$V_k^{(h+1)} = V_k^{(h)} + \gamma (V_{k,acc}^{(h+1)} - V_k^{(h)}) \quad (2.14)$$

สมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้แสดงเพียงแบบจำลองโหลดในรูปของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ในระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากแบบจำลองโหลดในรูปกำลังไฟฟ้ายังมีแบบจำลองโหลดที่นิยมใช้อีก 2 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองโหลดในรูปกระแสไฟฟ้า (current load model) และแบบจำลองโหลดในรูปอิมพีแดนซ์ (impedance load model) สำหรับสมการที่ใช้คำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า กรณีแบบจำลองโหลดกระแสไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ (2.15) และกรณีแบบจำลองโหลดอิมพีแดนซ์คำนวณได้จากสมการที่ (2.16) ดังนี้

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} - I_{D,k} \right\} \quad (2.15)$$

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{\left(Y_{k,k} + \frac{1}{Z_{D,k}} \right)} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k^{(h)})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2.16)$$

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

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป

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

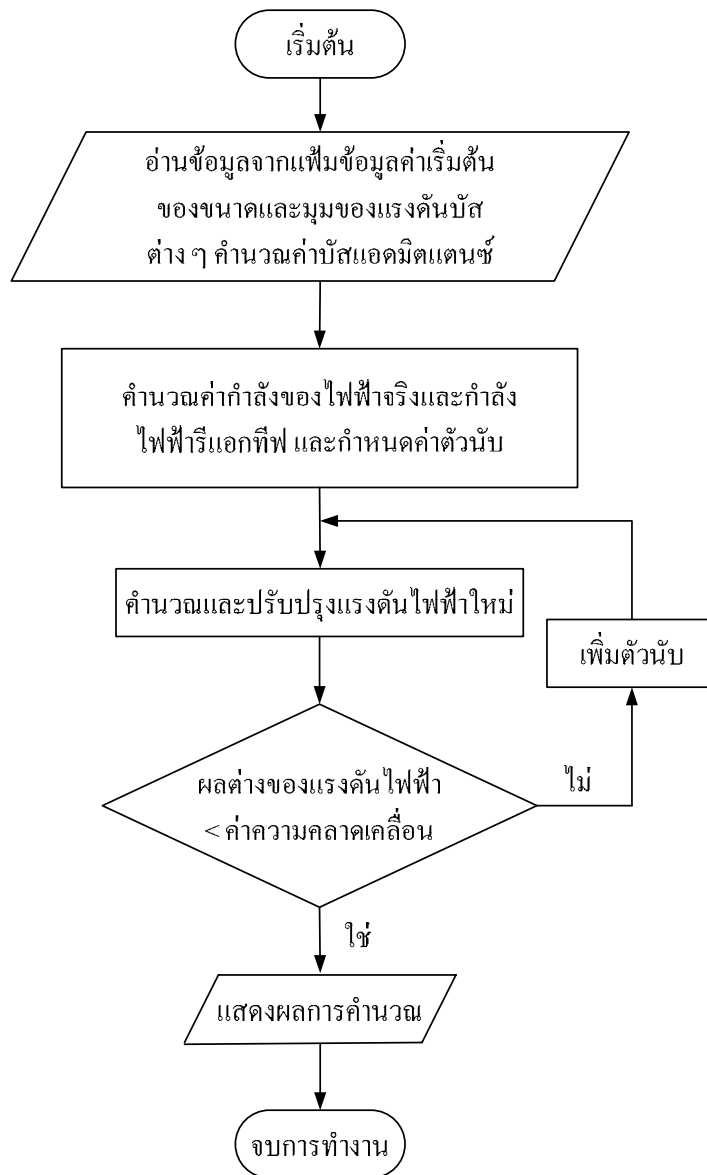
3) คำนวณผลต่างของกำลังไฟฟ้าจริง ($P_G - P_D$) และผลต่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ($Q_G - Q_D$) สำหรับบัสโหลด

4) คำนวณแรงดันไฟฟ้าในรอบที่ $(h+1)$ ที่บัสโหลด k ใด ๆ ($V_k^{(h+1)}$)

5) คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า $\Delta|V|$ ถ้า $\Delta|V|$ มีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่

6) ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

2.3.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\text{จากสมการที่ (2.9)} \quad \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*}$$

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

$$\frac{(S_{sch,k})^*}{(V_k)^*} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (2.17)$$

$$(S_{sch,k})^* = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (2.18)$$

สมการที่ (2.18) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} V_k &= |V_k| \angle \delta_k = |V_k| e^{j\delta_k} && \text{คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส } k \\ V_i &= |V_i| \angle \delta_i = |V_i| e^{j\delta_i} && \text{คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส } i \\ Y_{k,i} &= |Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i} = |Y_{k,i}| e^{j\theta_{k,i}} && \text{คือ สมาชิกแถวที่ } k \text{ หลักที่ } i \text{ ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.18) เมื่อพิจารณาในรูปพีคัดเชิงขั้ว จะได้ว่า

$$(S_{sch,k})^* = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^n (|Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i}) (|V_i| \angle \delta_i) \quad (2.19)$$

$$P_{sch,k} - jQ_{sch,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.20)$$

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

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.21)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันบัสที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้ จะทำให้สมการสมดุลอย่างไรก็ตาม ในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบัส ซึ่งทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นแบบราบเรียบ โดยการกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นของทุกบัส

มีค่า $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. หรือใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้าที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบ จะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บัสขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches) ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta P_k = P_{sch,k} - P_{cal,k} = f_{p,k} \quad (2.22)$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} = f_{q,k} \quad (2.23)$$

โดยที่
$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.24)$$

$$Q_{cal,k} = -\sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.25)$$

ใช้ระเบียบวิธีการวนรอบของนิวตัน-ราฟสัน ประมาณผลเฉลยของระบบสมการในรอบการคำนวณที่ $k+1$ ใดๆ จะได้

$$f_{p,k+1} = \Delta P_{k+1} = \Delta P_k + [\nabla f_{p,k}]^T \cdot \Delta X = 0 \quad (2.26)$$

$$\Delta P_k = -[\nabla f_{p,k}]^T \cdot \Delta X \quad (2.27)$$

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

$$\Delta P_k = -\left(\frac{\partial f_{p,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial f_{p,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \right) \quad (2.28)$$

เนื่องจาก $P_{sch,k}$ มีค่าคงที่

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

$$\Delta P_k = \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.29)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.30)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{cal}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{cal}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \text{M} \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \text{M} \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \text{L} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} & \text{L} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \text{L} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \text{L} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \text{M} & \text{M} & J1 & \text{M} & \text{M} & \text{M} & J2 & \text{M} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \text{L} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \text{L} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \text{L} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} & \text{L} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \text{L} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \text{L} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \text{M} & \text{M} & J3 & \text{M} & \text{M} & \text{M} & J4 & \text{M} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \text{L} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \text{L} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \text{M} \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \text{M} \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

ถ้าให้บัสที่ m เป็นบัสสลัก จากสมการที่ (2.32) หลักที่ $k = m$ และแถวที่ $k = m$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนได้ดังนี้

เมตริกซ์ย่อย $J1$: จากสมการที่ (2.24)

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.34)$$

เมตริกซ์ย่อย $J2$: จากสมการที่ (2.24)

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|Y_{k,k} V_k| \cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |Y_{k,i} V_k| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.36)$$

เมตริกซ์ย่อย $J3$: จากสมการที่ (2.25)

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.38)$$

เมตริกซ์ย่อย $J4$: จากสมการที่ (2.25)

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|Y_{k,k} V_k| \sin(\theta_{k,k}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|Y_{k,i} V_k| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.32) สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ $h+1$ โดยคำนวณเมตริกซ์ผกผันจาโคเบียน จะได้

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{-1(h)} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(h)} \quad (2.41)$$

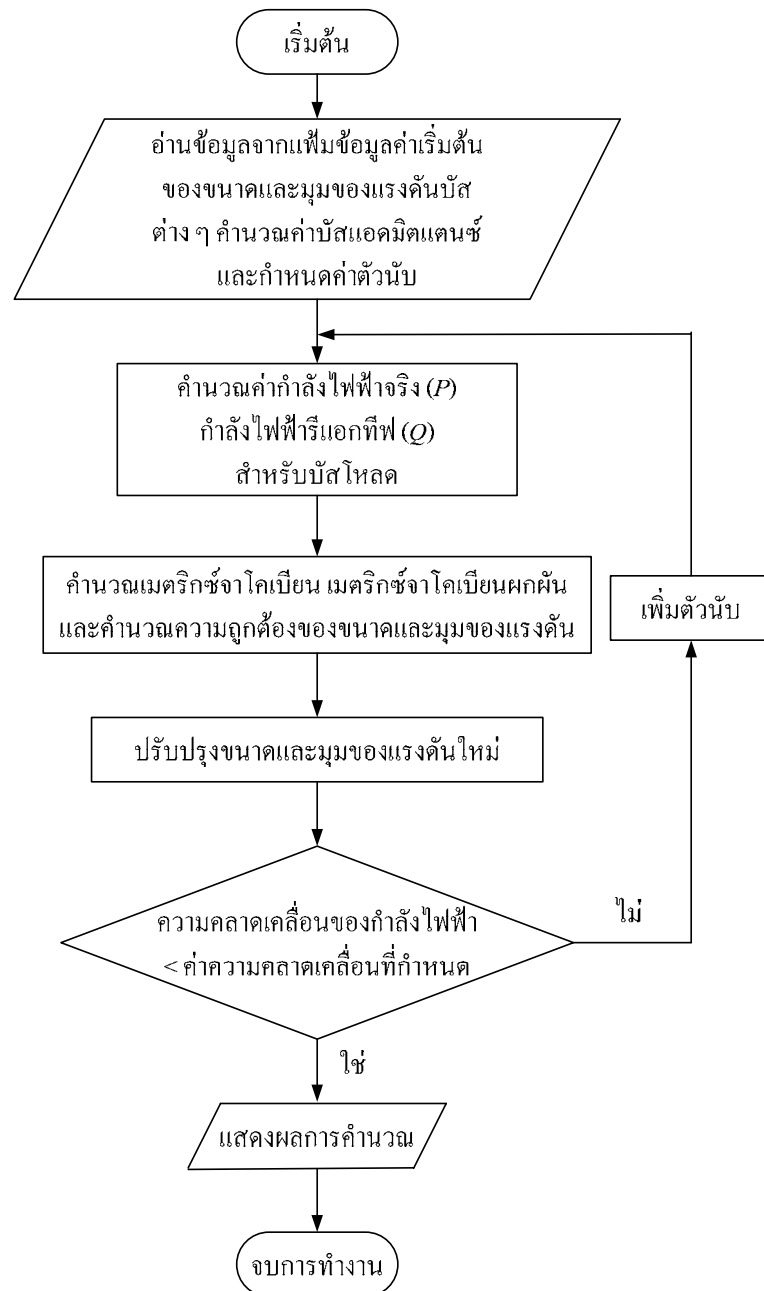
การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ หรือ

$$\max(|P_{mis,max}|, |Q_{mis,max}|) < \varepsilon_{tol}$$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

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

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.3



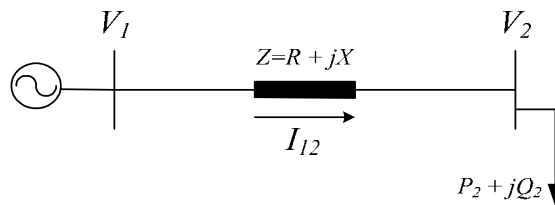
รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power distribution systems)

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลาง สำหรับประเทศไทย มี 2 ระดับด้วยกันคือ 22 kV เป็นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ 24 kV เป็นของการไฟฟ้านครหลวง ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายโครงสร้าง แต่โดยทั่วไประบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีโครงสร้างเป็นแบบรัศมี (radial feed configuration) เป็นโครงสร้างที่รับไฟจากแหล่งเดียวผ่านสายส่งชุดใดชุดหนึ่ง

มีประโยชน์คือ กระแสผิดพลาดมีขนาดน้อยที่สุด ลดราคาของอุปกรณ์ควบคุม และง่ายต่อการป้องกันระบบ แต่มีข้อเสียคือ มีความน่าเชื่อถือในการจ่ายไฟต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของระบบที่เป็นแบบรัศมีทำให้การตัดแปลงระบบจำหน่ายทำได้โดยการเปิดปิดสวิตช์โดยมีวัตถุประสงค์คือลดกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้าและระบบสามารถจ่ายโหลดได้อย่างสมดุล ดังปรากฏใน Baran and Wu (1989) โดยทั่วไประบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นสายส่งที่มีระยะสั้นผลจากความจุไฟฟ้าของสายส่งจะมีค่าน้อยมาก ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการคำนวณเมื่อไม่คิดผลของความจุไฟฟ้าจึงน้อยด้วยเช่นกัน ดังนั้น แบบจำลองสายส่งระยะสั้นจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า ดังปรากฏในงานวิจัยของ Salama and Chikhani (1993); Sharaf and Ibrahim (1996); Prakash and Sydulu (2007)

เมื่อกำหนดผลเฉลยแรงดันบัสเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง เพื่อดูการกระจายของการไหลของกำลังไฟฟ้าว่ามีทิศทางไปในทางใดและเป็นปริมาณเท่าใด กำลังงานสูญเสียในสายส่ง ตลอดจนแรงดันตกเป็นเท่าไร คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ระบบทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดและประหยัด (ชนัดชัย กุลวรรณิขพงษ์, 2549)



รูปที่ 2.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 บัส

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

$$P_{loss} = (I_{12})^2 R = \left(\frac{V_1 - V_2}{Z} \right)^2 R \quad (2.42)$$

$$Q_{loss} = (I_{12})^2 X = \left(\frac{V_1 - V_2}{Z} \right)^2 X \quad (2.43)$$

โดยทั่วไปแล้วฟังก์ชันค่าเฉลี่ยเพลิงของโรงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเป็นกำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ที่โหลด กำลังงานชนิดนี้ก็คือ กำลังเฉลี่ย (average power) นั่นเอง ซึ่งต่างจากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่นชั่วคราวเท่านั้น โดยที่กำลังเฉลี่ยในหนึ่งวัฏจักรเท่ากับศูนย์ หรืออาจกล่าวได้ว่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า ถ้าความต้องการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมีมากขึ้นเท่าใด ค่าเฉลี่ยเพลิงก็จะมากตามไปด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจึงมีความสำคัญในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทำให้การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปมุ่งที่การลดกำลังงานสูญเสียแอกทีฟมากกว่ากำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ ดังปรากฏในงานวิจัยของ Haque (1999); AlHajri, AlRashidi, and El Hawary (2007) ผลที่ได้จากการลดกำลังงานสูญเสียไฟฟ้าแอกทีฟก็คือกำลังงานสูญเสียไฟฟ้ารีแอกทีฟจะลดลงด้วย จากสมการที่ (2.42) พบว่าตัวแปรที่สำคัญได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่บัสรับและบัสส่ง ถ้าสามารถทำให้แรงดันที่บัสมีความแตกต่างกันน้อยได้เท่าไรกำลังงานสูญเสียในระบบจะลดลงได้มากตามไปด้วย ถ้าหากกำลังงานสูญเสียแอกทีฟมีค่าลดลงจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายมีค่าลดลง ทำให้ต้นทุนค่าเฉลี่ยเพลิงลดลงเช่นกัน โดยแนวทางดังกล่าวสามารถทำได้โดยการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

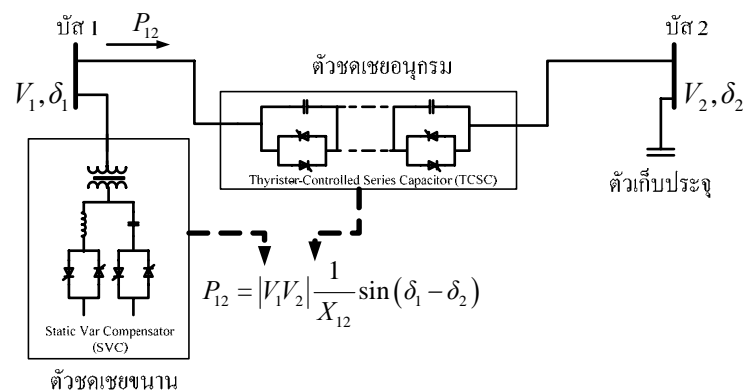
2.5 การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power compensation)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อลดกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่งผลกระทบต่อกำลังงานสูญเสียและแรงดันตกในระบบ ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อชดเชยความต้องการของโหลดและชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียต่ำและระดับแรงดันตกมีค่าลดลง (ชนิดชัย กุลวรรานิชพงษ์, 2549) นอกจากนี้การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟยังช่วยเพิ่มขีดจำกัดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของสายส่งให้มีค่าสูงขึ้นด้วย การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุกรม รูปแบบขนาน และรูปแบบผสม สำหรับตัวชดเชยในที่นี่จะกล่าวถึงตัวชดเชยในรูปแบบอนุกรมและรูปแบบขนานเท่านั้น ตัวชดเชยที่จะกล่าวถึงจัดอยู่ในตระกูล Flexible AC Transmission Systems หรือเรียกย่อ ๆ ว่า FACTS และตัวเก็บประจุ ตัวชดเชยที่กล่าวมาจะมีหน้าที่และวิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) การชดเชยแบบอนุกรม (series compensation)

ตัวชดเชยแบบอนุกรมของอุปกรณ์ FACTS มีหลายชนิด ได้แก่ Dynamic Voltage Restorer (DVR), Static Synchronous Series Compensator (SSSC), Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) ตัวชดเชยทั้งสามมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือ DVR และ SSSC จะใช้การ

สวิตช์แบบ converter ในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แต่ TCSC จะใช้ไทรสเตอร์เป็นสวิตช์ทีละตัว จากรูปที่ 2.5 ตัวชดเชยแบบอนุกรมจะต่อระหว่างบัสโหลดที่ต้องการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่กับสายส่งเป็นต้นเหตุของแรงดันตกคร่อมในสายส่ง ดังนั้น เมื่อทำการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม อิมพีแดนซ์ของตัวชดเชยจะอนุกรมกับสายส่งทำให้อิมพีแดนซ์รวมของสายส่งลดลงและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีขนาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 แบบแผนพื้นฐานไทรสเตอร์ของตัวควบคุม FACTS

2) การชดเชยแบบขนาน (shunt compensation)

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

3) การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor compensation)

ตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยอีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งมีค่ามากขึ้นหรือช่วยเพิ่มขีดจำกัดของสายส่ง การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุสามารถทำได้ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน การต่อตัวเก็บประจุนุกรมกับสายส่งมีจุดประสงค์เพื่อชดเชยค่า X_L ที่มีอยู่ในสายส่งเส้นนั้น ๆ การต่อลัดขณะนี้จะทำให้ค่า X_C ไปชดเชยกับ X_L ของสายส่ง ส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมในสายส่งมีค่าลดลง ทำให้แรงดันที่บัสรับมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งยังไม่มีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังที่บัสรับอีกด้วย แต่การต่อตัวเก็บประจุนุกรมเข้าไป

ในสายส่งอาจก่อให้เกิดปัญหาบางประการที่เรียกว่า subsynchronous resonance ซึ่งทำให้กระแสมีค่าสูงกว่าปกติและอาจเกิดผลเสียหายต่อระบบได้ สำหรับการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบขนานกับสายส่งเป็นที่นิยมมากในระบบไฟฟ้าย่อย การต่อในลักษณะนี้ตัวเก็บประจุจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับโหลดจำพวก Inductive load ซึ่งจะคล้ายกับการทำงานของ Synchronous Generator ที่ทำการกระตุ้นด้วย Over-excitation ทำให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายมีค่าลดลงแรงดันในระบบโดยรวมมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลงไปด้วย

นอกจากปัญหาเรื่องการเลือกชนิดของอุปกรณ์ชดเชยเพื่อให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแล้ว การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมยังคงเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจมากเช่นกัน โดยทั่วไปในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตำแหน่งการติดตั้งมักเลือกที่สถานี เนื่องจากง่ายต่อการดูแลและบำรุงรักษา แต่สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ตำแหน่งติดตั้งยังคงเป็นปัญหาเปิด คือสามารถติดตั้งที่ตำแหน่งใดก็ได้ไม่ว่าจะเป็นที่บัสโหลดหรือแม้แต่ระหว่างสายส่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการชดเชยดังกล่าวด้วย

2.6 กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด (loss minimization)

การจำลองผลการไหลกำลังไฟฟ้า โดยใช้การโปรแกรมและการหากำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนในระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถเขียนแทนด้วยไดอะแกรมเส้นเดียว ซึ่งมีการเชื่อมต่อบรรยากาศประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่งหรือสายจำหน่าย และโหลด ส่วนประกอบทั้งหมด เช่น สายส่งและหม้อแปลงจะมีความต้านทาน ซึ่งจะทำให้เกิดกำลังงานสูญเสีย ถ้ามีกระแสไหลผ่าน กำลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไหลในอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับบัส สามารถคำนวณได้โดยการจำลองผลการไหลกำลังไฟฟ้า ค่าต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียมีความสำคัญมาก เพราะจะเกี่ยวข้องกับหลักเศรษฐศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าทราบว่ากำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นที่จุดใด ก็สามารถทำให้มีค่าต่ำที่สุดได้ กำลังงานสูญเสียสามารถหาได้หลายวิธี กำลังงานสูญเสียในสายส่งสามารถคำนวณได้จาก I^2R หรือผลรวมของกำลังงานสูญเสียทั้งระบบ สามารถหาจากกำลังไฟฟ้าที่หายไปสายส่งจากต้นสายกับปลายสาย (Rider, Paucar, and Garcia, 2004) ในการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบไฟฟ้ากำลัง กำหนดโดยการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย การไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow: OPF) วัตถุประสงค์ของ OPF คือใช้หาการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะคงตัวของระบบไฟฟ้ากำลัง ปัญหา OPF อาจจะมีแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวัตถุประสงค์คือ เทคนิคการหาค่าต่ำสุดของกำลังงานสูญเสีย และเงื่อนไขทางเศรษฐกิจ สำหรับวิธีการคำนวณกำลังงานสูญเสีย

คำนวณจาก OPF กับเงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้นแบบเท่ากันและแบบไม่เท่ากัน ซึ่งคำนึงถึงความปลอดภัยในระบบไฟฟ้ากำลัง OPF แก้ไขโดยใช้วิธีการคูณของตัวทำนายและตัวปรับแก้ (Multiple Predictor-Corrector: MPC) ของตระกูลอันดับสูงของวิธีการจุดภายใน (interior-point) สำหรับคำนวณความยาวขั้นระหว่างการวนซ้ำแบบนิวตัน วิธีการของ MPC จะมีการลู่เข้าที่เร็ว การวนรอบน้อย และใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ (Lukman and Blackburn, 2001)

2.7 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (voltage stability in power distribution systems)

การป้องกันปัญหาการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง วิศวกรต้องการดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (voltage stability index) ที่มีความไวและแม่นยำในการทำนาย เพื่อช่วยแสดงเงื่อนไขในการทำงานของระบบให้อยู่ในขอบเขตของความปลอดภัย ได้มีการพัฒนาแนวคิดสำหรับออกแบบดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากมาย เช่น (Abdul Rahman and Jasmon, 1995) ได้นำเสนอเทคนิคในการหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสถิตของบัสโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง เงื่อนไขในการทำงานได้ทำการจำแนกบัสโหลดที่เสี่ยงต่อการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าโดยดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้านี้หาได้จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโครงข่ายระบบไฟฟ้า 2 บัส และคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลเทวินินของระบบไฟฟ้ากำลังที่อ้างอิงไปที่บัสโหลด ดัชนีจะแสดงให้เห็นว่าบัสโหลดมีแรงดันไฟฟ้าที่บัสอยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือไม่ วิธีการนี้จะทดสอบกับเฉพาะบัสโหลดเท่านั้น เพราะฉะนั้นอาจจะเกิดการทำนายที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากบางกรณีอาจจะมีบัสโหลดที่ไม่มีโหลดเชื่อมต่ออยู่ เกิดการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าได้ต่อมา (Musirin and Abdul Rahman, 2002) ใช้กระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าแบบเร็ว (Fast Voltage Stability Index: FVSI) สามารถหาสายส่งเส้นที่มีความเสี่ยงอันตรายจากการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า และรวมถึงบัสที่เสี่ยงต่ออันตรายจากการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าได้ FVSI มีประสิทธิภาพสูงในการประมาณค่าสายส่งและบัส ขณะที่กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่มีค่าต่ำ แสดงว่าบัสนั้นมีความเสี่ยงสูงในระบบไฟฟ้ากำลัง FVSI จะใช้สมการการคำนวณเงื่อนไขของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบโดยอ้างอิงที่สายส่ง สูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้ค่อนข้างง่ายและสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว FVSI สามารถอ้างอิงที่บัสหรือสายส่งก็ได้ สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอนี้จะอ้างอิงที่บัส โดยทั่วไป FVSI จะเริ่มคำนวณจากสมการกระแสในลักษณะของสมการกำลังสองของกำลังไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า (Moghavemmi and Omar, 1998) ได้หาดัชนีเสถียรภาพสายส่ง (Line Stability Index: L_{sm}) ซึ่งมีแนวคิดจะอยู่บนพื้นฐานของสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองแบบพาย โดยแนวคิดของดัชนีนี้คล้ายกับ (Liu Baozhu and Li Bolong, 2008) ซึ่งหาดัชนีเสถียรภาพแรงดัน (On-Line Voltage Stability Index: L_{vSI}) ซึ่งมีแนวคิดจะอยู่บนพื้นฐาน

ของสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองแบบพายเช่นเดียวกัน ส่วน (T.K. Abdul Rahman and G.B. Jasmon, 1995) ได้หาดัชนีเสถียรภาพแรงดัน (Voltage Stability Index: L) โดยแนวคิดอยู่บนพื้นฐานของสายส่งกำลังไฟฟ้า สมการเริ่มต้นจากสมการกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังระบบบัส 2 บัส จากการทดสอบ FVSI สามารถระบุตำแหน่งสายส่งและบัสที่เสี่ยงต่อการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำและผลการทดสอบคล้ายกับดัชนี L_{min} ดัชนี L_{VSI} และดัชนี L ทำให้ FVSI มีผลการทดสอบการทำงานที่สามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะตรวจสอบเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ FVSI เนื่องจากสมการที่ใช้คำนวณไม่สลับซับซ้อนและสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว และมีความเชื่อถือได้

2.8 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ไม่ได้พิจารณาผลของการเพิ่มโหลดหรือการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง การชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาผลของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยการพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะคงตัวจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

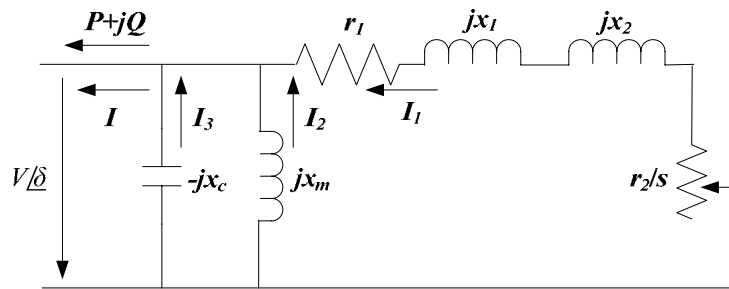
การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในบทที่ 2 เป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบในสภาวะคงตัว ระบบประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สายป้อน และโหลด โดยไม่มีการติดตั้งตัวชดเชยเข้าไปในระบบ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองในสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงานในสภาวะคงตัวในรูปของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเสนอกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองชนิด คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง (self-excited induction generator: SEIG) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน (doubly-fed induction generator: DFIG) ซึ่งได้กล่าวถึงแบบจำลองสองแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้าซึ่งกล่าวถึงสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อใช้สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ซึ่งกล่าวถึงการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ เนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบ ส่งผลให้เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย รวมถึงการหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันต้องปรับปรุงสมการการคำนวณ เพื่อให้ได้ผลเฉลยแรงดันที่ได้ถูกต้อง

3.2 แบบจำลองในสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง

3.2.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model)

จากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น พบว่า แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง สามารถพิจารณาได้จากรูป ดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง

- โดยที่ x_1 คือ รีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์
 x_2 คือ รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์
 r_1 คือ ความต้านทานของสเตเตอร์
 r_2 คือ ความต้านทานของโรเตอร์
 x_m คือ รีแอกแตนซ์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 x_c คือ รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ
 s คือ สลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 V คือ ขนาดแรงดันอนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 δ คือ มุมเฟสแรงดันอนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.1 สามารถคำนวณหากระแสที่ไหลในแต่ละจุด ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{-V(\cos \delta + j \sin \delta)}{\frac{r_2}{s} + j x} \quad (3.1)$$

เมื่อ $x = x_1 + x_2$ และไม่พิจารณาผลของ r_1

จากรูปที่ 3.1 สามารถคำนวณ I_1 ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{-V(\cos \delta + j \sin \delta)}{\frac{r_2}{s} + j x} \times \frac{\left(\frac{r_2}{s} - j x\right)}{\left(\frac{r_2}{s} - j x\right)} \quad (3.2)$$

$$I_1 = \frac{-V(\cos \delta + j \sin \delta)}{\left(\frac{r_2^2 + s^2 x^2}{s^2}\right)} \times \left(\frac{r_2}{s} - j x\right) \quad (3.3)$$

$$I_1 = \frac{-V\left(\frac{r_2}{s} \cos \delta + x \sin \delta\right) + j V\left(x \cos \delta - \frac{r_2}{s} \sin \delta\right)}{\left(\frac{r_2^2 + s^2 x^2}{s^2}\right)} \quad (3.4)$$

จะได้

$$I_1 = \frac{-(sr_2 V \cos \delta + s^2 x V \sin \delta) + j (s^2 x V \cos \delta - sr_2 V \sin \delta)}{r_2^2 + s^2 x^2} \quad (3.5)$$

จากรูปที่ 3.1 สามารถคำนวณกระแส I_2 ได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{-V(\cos \delta + j \sin \delta)}{j x_m} \quad (3.6)$$

จัดรูปสมการ จะได้

$$I_2 = \frac{-V \sin \delta + j V \cos \delta}{x_m} \quad (3.7)$$

จากรูปที่ 3.1 สามารถคำนวณกระแส I_3 ได้ดังนี้

$$I_3 = \frac{-V(\cos \delta + j \sin \delta)}{-j x_c} \quad (3.8)$$

จัดรูปสมการ จะได้

$$I_3 = \frac{V \sin \delta - jV \cos \delta}{x_c} \quad (3.9)$$

คำนวณหากระแสทั้งหมด จาก $I = I_1 + I_2 + I_3$ จะได้

$$I = \left(\frac{-(sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta) - V \sin \delta}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \sin \delta}{x_p} \right) + j \left(\frac{(s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta) - V \cos \delta}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \cos \delta}{x_p} \right) \quad (3.10)$$

เมื่อ $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}$

คำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$S = VI^* = P + jQ$$

จัดรูปสมการ ได้ดังนี้

$$S = V(\cos \delta + j \sin \delta) \left(\frac{-(sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta) - V \sin \delta}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \sin \delta}{x_p} \right) + V(\cos \delta + j \sin \delta) \left(-j \left(\frac{(s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta) - V \cos \delta}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \cos \delta}{x_p} \right) \right) \quad (3.11)$$

เปรียบเทียบพจน์ $S = P + jQ$ จะได้ว่า

$$P^{SEIG} = -\frac{sr_2V^2}{r_2^2 + s^2x^2} \quad (3.12)$$

$$Q^{SEIG} = -\left(\frac{s^2xV^2}{r_2^2 + s^2x^2} + \frac{V^2}{x_p} \right) \quad (3.13)$$

แทนสมการ (3.12) ลงใน (3.13) จะได้

$$Q^{SEIG} = \frac{Psx}{r_2} - \frac{V^2}{x_p} \quad (3.14)$$

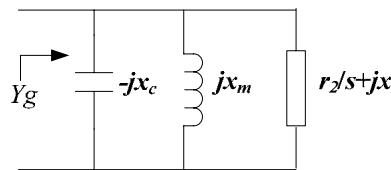
จากสมการ (3.12) สามารถจัดรูปสมการ ได้ดังนี้

$$s = \frac{-V^2 r_2 + \sqrt{V^4 r_2 - 4P^2 x^2 r_2^2}}{2Px^2} \quad (3.15)$$

สมการที่ (3.12) และ (3.13) เป็นสมการเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะแก้ปัญหาโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน การวิเคราะห์สมรรถนะในสภาวะคงตัวของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง และการควบคุมการทำงานเพื่อให้กำลังงานสูญเสีย น้อยที่สุดในขณะที่ยังรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ จะนำเสนอในส่วนตัวไป

3.2.2 แบบจำลองแอดมิแตนซ์ (Admittance model)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.1 สามารถเขียนวงจรใหม่ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แบบจำลองแอดมิแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง

จากรูปที่ 3.2 สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์รวมของวงจร ได้ดังนี้

$$Z_g = -jx_c // jx_m // (r_2/s + jx) \quad (3.16)$$

คำนวณในรูปแอดมิแตนซ์รวมของวงจร ได้ดังนี้

$$Y_g = \frac{1}{-jx_c} + \frac{1}{jx_m} + \frac{1}{r_2/s + jx} \quad (3.17)$$

จัดรูปสมการ จะได้ว่า

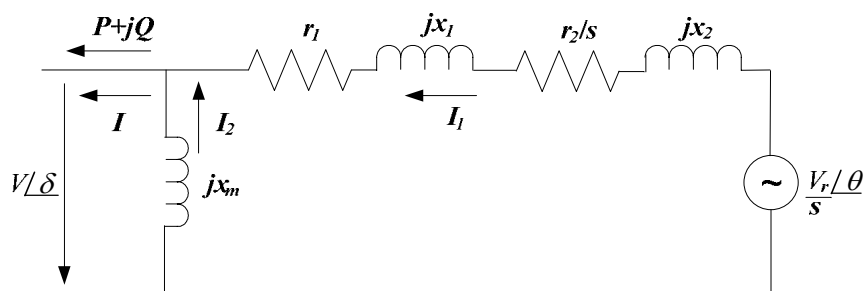
$$Y_g = \frac{sr_2}{r_2^2 + s^2x^2} - j \frac{r_2^2 + s^2x^2 + x_p s^2x}{x_p(r_2^2 + s^2x^2)} \quad (3.18)$$

พิจารณาสมการที่ (3.18) ซึ่งเป็นสมการแอดมิตแตนซ์รวมของวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง และสมการที่ (3.15) พบว่าค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจร ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ดังนั้นในขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัว ร่วมกับแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ต้องมีการปรับปรุงค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริก (\mathbf{Y}_{bus}) ด้วยค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจร ในทุก ๆ รอบการคำนวณ

3.3 แบบจำลองในสถานะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน

3.3.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model)

จากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น พบว่า แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน สามารถพิจารณาได้จากรูป 3.3 ดังนี้



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน

โดยที่ V_r คือ ขนาดแรงดัน โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

θ คือ มุมเฟสแรงดัน โรเตอร์ของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.3 สามารถคำนวณหากระแสที่ไหลในแต่ละจุด ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{V_r (\cos \theta + j \sin \theta) - V (\cos \delta + j \sin \delta)}{\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right) + j (x_1 + x_2)} \quad (3.19)$$

จัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$I_1 = \frac{V_r (\cos \theta + j \sin \theta) - sV (\cos \delta + j \sin \delta)}{(r_1 s + r_2) + j s (x_1 + x_2)} \quad (3.20)$$

เมื่อ $x = x_1 + x_2$ และ $R = r_1 s + r_2$ จะได้

$$I_1 = \frac{V_r (\cos \theta + j \sin \theta) - sV (\cos \delta + j \sin \delta)}{(R + j sX)} \quad (3.21)$$

สามารถคำนวณ I_1 ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{V_r (\cos \theta + j \sin \theta) - sV (\cos \delta + j \sin \delta)}{(R + j sX)} \times \frac{(R - j sX)}{(R - j sX)} \quad (3.22)$$

$$I_1 = \frac{(V_r \cos \theta - sV \cos \delta) + j(V_r \sin \theta - sV \sin \delta)}{R^2 + (sX)^2} \times (R - j sX) \quad (3.23)$$

จะได้

$$I_1 = \frac{(V_r \cos \theta - sV \cos \delta)R + (V_r \sin \theta - sV \sin \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} + j \left(\frac{(V_r \sin \theta - sV \sin \delta)R - (V_r \cos \theta - sV \cos \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} \right) \quad (3.24)$$

จากรูปที่ 3.3 สามารถคำนวณกระแส I_2 ได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{-V(\cos \delta + j \sin \delta)}{j x_m} \quad (3.25)$$

จัดรูปสมการ จะได้

$$I_2 = \frac{-V \sin \delta + jV \cos \delta}{x_m} \quad (3.26)$$

คำนวณหากระแสทั้งหมด จาก $I = I_1 + I_2$ จะได้

$$I = \frac{(V_r \cos \theta - sV \cos \delta)R + (V_r \sin \theta - sV \sin \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} - \frac{V \sin \delta}{x_m} + j \left(\frac{(V_r \sin \theta - sV \sin \delta)R - (V_r \cos \theta - sV \cos \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} + \frac{V \cos \delta}{x_m} \right) \quad (3.27)$$

คำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$S = VI^* = P + jQ \quad (3.28)$$

เปรียบเทียบพจน์ $S = P + jQ$ จะได้ว่า

$$P = \left(\frac{(V_r \cos \theta - sV \cos \delta)R + (V_r \sin \theta - sV \sin \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} - \frac{V \sin \delta}{x_m} \right) V \cos \delta + \left(\frac{(V_r \sin \theta - sV \sin \delta)R - (V_r \cos \theta - sV \cos \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} + \frac{V \cos \delta}{x_m} \right) V \sin \delta$$

$$Q = \left(\frac{(V_r \cos \theta - sV \cos \delta)R + (V_r \sin \theta - sV \sin \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} - \frac{V \sin \delta}{x_m} \right) V \sin \delta$$

$$- \left(\frac{(V_r \sin \theta - sV \sin \delta)R - (V_r \cos \theta - sV \cos \delta)sX}{R^2 + (sX)^2} + \frac{V \cos \delta}{x_m} \right) V \cos \delta$$

จัดรูปสมการ ได้ดังนี้

$$P^{DFIG} = \frac{RV_r V \cos(\delta - \theta) - sXV_r V \sin(\delta - \theta) - sRV^2}{R^2 + (sX)^2} \quad (3.29)$$

$$Q^{DFIG} = \frac{RV_r V \sin(\delta - \theta) + sXV_r V \cos(\delta - \theta) - s^2 XV^2}{R^2 + (sX)^2} - \frac{V^2}{x_m} \quad (3.30)$$

สมการที่ (3.29) และ (3.30) เป็นสมการเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะแก้ปัญหาโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน การวิเคราะห์สมรรถนะในสภาวะคงตัวของระบบ จำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน และการควบคุมการทำงานเพื่อให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในขณะที่ยังคงรักษาระดับแรงดันที่โหลดให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ จะนำเสนอใน ส่วนต่อไป

3.4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

หัวข้อนี้แนะนำเสนอวิธีการคำนวณผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง ซึ่งจะพิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 แบบจำลองด้วยกัน คือ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model) และแบบจำลองที่สอง คือ แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (admittance model) ดังนี้

3.4.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model)

สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเริ่มต้นจากสมการความคลาดเคลื่อนของผลรวมของกำลังงานไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ หรือเรียกว่า สมการความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches equation) ดังนี้

$$\Delta P_k = P_{sch,k} - P_{cal,k} + \sum_{i=1}^m P_{k,i}^{SEIG} \quad (3.31)$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} + \sum_{i=1}^m Q_{k,i}^{SEIG} \quad (3.32)$$

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

$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.33)$$

$$Q_{cal,k} = -\sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.34)$$

$$P_{k,i}^{SEIG} = -\frac{sr_2 V_k^2}{r_2^2 + s^2 x^2} \quad (3.35)$$

$$Q_{k,i}^{SEIG} = -\left(\frac{s^2 x V_k^2}{r_2^2 + s^2 x^2} + \frac{V_k^2}{x_p} \right) \quad (3.36)$$

สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า จะพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG เป็นค่าคงที่และพิจารณาค่าสลิปของ SEIG เป็นค่าคงที่ ดังนี้

3.4.1.1 พิจารณาค่าสลิปของ SEIG เป็นค่าคงที่

เมื่อกำหนดค่าสลิปของ SEIG เป็นค่าคงที่ พบว่าทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของแรงดัน ดังสมการ (3.35) และ (3.36) ดังนั้นการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะต้องมีการปรับเปลี่ยนสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ในทุก ๆ รอบการคำนวณ โดยต้องปรับเปลี่ยนค่า $\frac{\partial(P_k)}{\partial|V_k|}$ ในเมตริกซ์ย่อย J_2 และปรับเปลี่ยนค่า $\frac{\partial(Q_k)}{\partial|V_k|}$ ในเมตริกซ์ย่อย J_4 ในจาโคเบียนเมตริกซ์ โดยการปรับค่าในจาโคเบียนเมตริกซ์ แสดงเฉพาะส่วนที่มีการปรับเปลี่ยนค่า ได้ดังนี้

เมตริกซ์ย่อย J_2 :

$$\frac{\partial(P_k)^{new}}{\partial|V_k|} = \frac{\partial(P_k)^{old}}{\partial|V_k|} + \frac{\partial(P_k^{SEIG})}{\partial|V_k|} \quad (3.37)$$

โดยที่
$$\frac{\partial(P_k)^{old}}{\partial|V_k|} = 2|Y_{k,k}V_k|\cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_i|\cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial(P_k^{SEIG})}{\partial|V_k|} = -\frac{2V_ksr_2}{r_2^2 + s^2x^2} \quad (3.39)$$

เมตริกซ์ย่อย J_4 :

$$\frac{\partial(Q_k)^{new}}{\partial|V_k|} = \frac{\partial(Q_k)^{old}}{\partial|V_k|} + \frac{\partial(Q_k^{SEIG})}{\partial|V_k|} \quad (3.40)$$

โดยที่
$$\frac{\partial(Q_k)^{old}}{\partial|V_k|} = -2|Y_{k,k}V_k|\sin(\theta_{k,k}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_i|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.41)$$

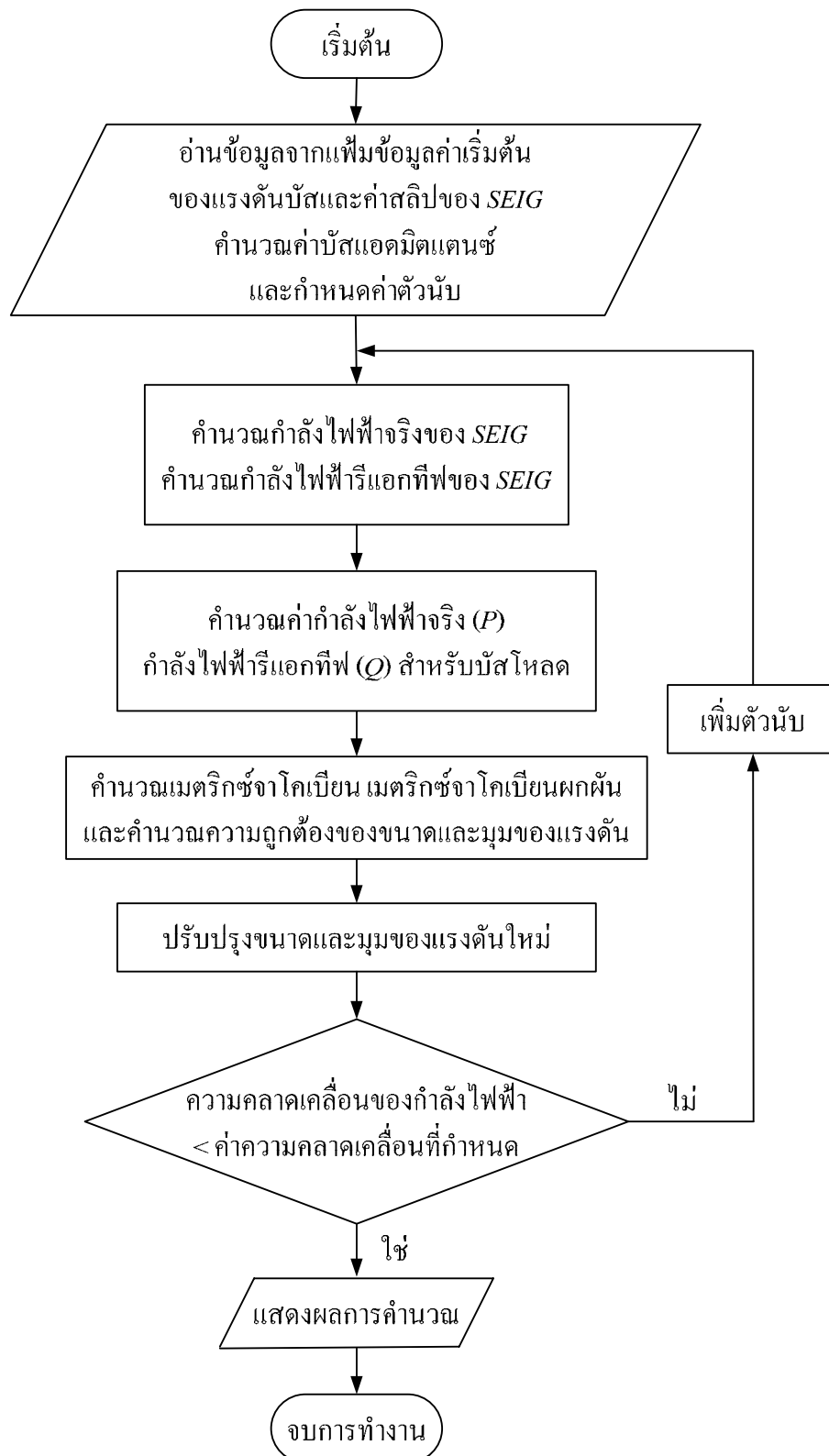
$$\frac{\partial(Q_k^{SEIG})}{\partial|V_k|} = -2V_k \left(\frac{s^2x}{r_2^2 + s^2x^2} + \frac{1}{x_p} \right) \quad (3.42)$$

สมการที่ (3.37) และ (3.40) เป็นสมการที่แสดงถึงการเปลี่ยนค่าของเมตริกซ์จาโคเบียน โดยการปรับเปลี่ยนเมตริกซ์ย่อย J_2 และ เมตริกซ์ย่อย J_4 ตามลำดับ สำหรับการคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนในส่วนของเมตริกซ์ย่อย J_1 และ J_3 จะเหมือนกับวิธีนิวตัน-ราฟสันรูปแบบปกติในบทที่ 2 ทุกประการ

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนี้

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

แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาค่าสลิปของ SEIG เป็นค่าคงที่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพการคำนวณการไหล กำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปเป็นค่าคงที่

3.4.1.2 พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG เป็นค่าคงที่

เมื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG เป็นค่าคงที่ พบว่าขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ ดังนี้

$$P^{SEIG} = P_{constant} \quad (3.43)$$

$$Q^{SEIG} = -\left(\frac{s^2 x V^2}{r_2^2 + s^2 x^2} + \frac{V^2}{x_p}\right) \quad (3.44)$$

พิจารณาสมการ (3.14) และ (3.15) จะได้ว่า

$$Q^{SEIG} = \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2 x^2}}{2x} - \frac{V^2}{x_p} \quad (3.45)$$

การกำหนดค่าเริ่มต้นของกำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG เป็นค่าคงที่ ต้องอยู่ในขอบเขตที่ไม่ทำให้ค่าสลิปในสมการ (3.15) เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนดจะต้องสอดคล้องกับสมการ (3.46)

$$V^4 r_2 - 4P^2 x^2 r_2^2 \geq 0 \quad (3.46)$$

สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ต้องปรับเปลี่ยนสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ในทุก ๆ รอบการคำนวณ โดยต้องปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าของ $\frac{\partial(Q_k)}{\partial|V_k|}$ ในเมตริกซ์ย่อย J_4 เท่านั้น ดังรายละเอียดตามสมการ (3.40)-(3.42) ส่วนการคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนในส่วน of เมตริกซ์ย่อย J_1 - J_3 จะเหมือนกับวิธีนิวตัน-ราฟสันรูปแบบปกติในบทที่ 2 ทุกประการ

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป

2) กำหนดค่าเริ่มต้นกำลังไฟฟ้าจริง (P^{SEIG}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบ

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

4) คำนวณค่าสลิป (s) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q^{SEIG}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด

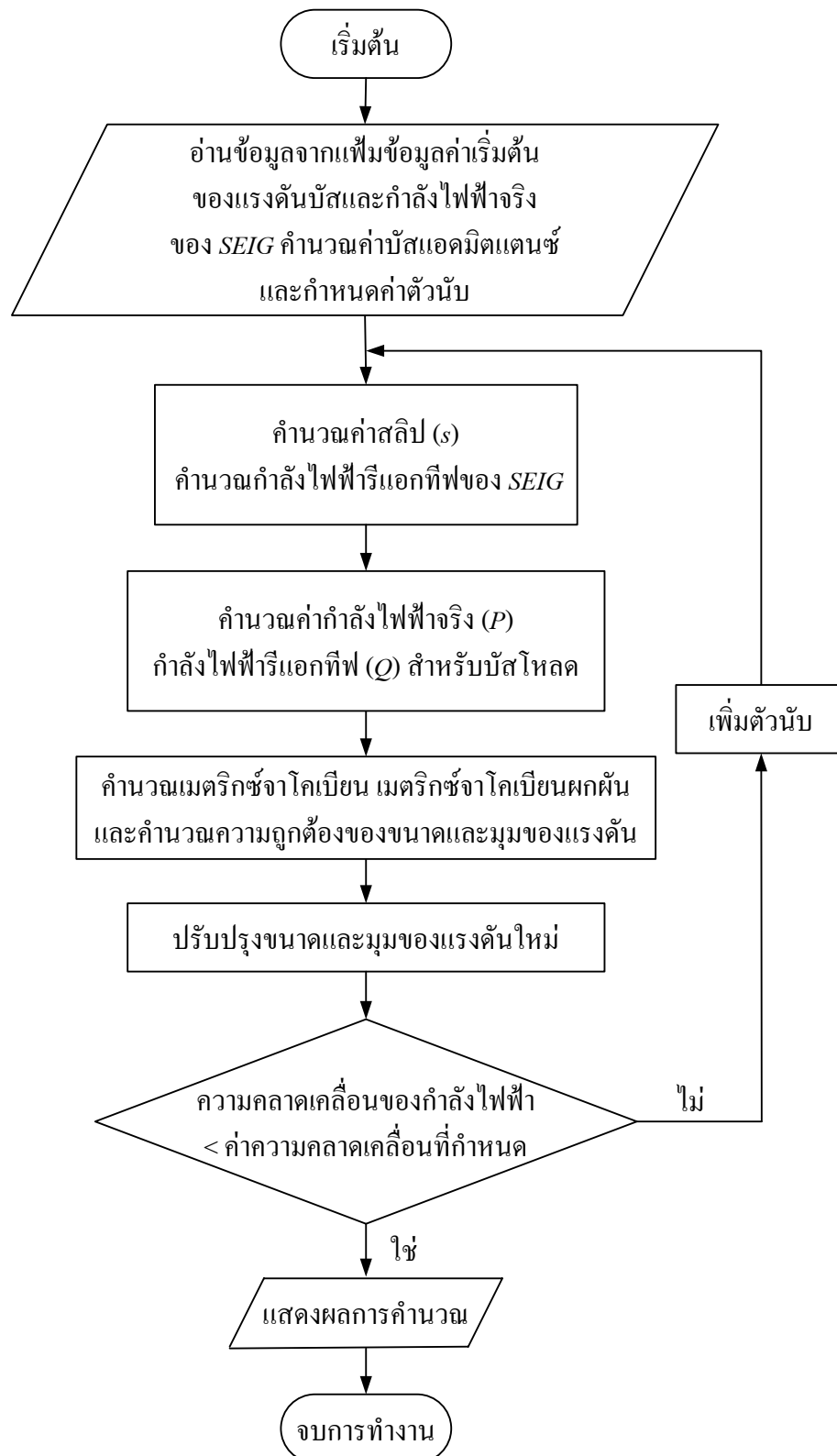
6) คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ J_1 - J_4 คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ทุกบัส

7) คำนวณ δ และ $|V|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ กับค่าเก่า

8) ตรวจสอบค่า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่

9) ถ้า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG เป็นค่าคงที่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าจริงเป็นค่าคงที่

3.4.2 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (Admittance model)

สมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิตกระตุ่นตัวเองในรูปแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และการคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน จะเหมือนกับวิธีนิวตัน-ราฟสันรูปแบบปกติในบทที่ 2 ทุกประการ โดยในขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในทุก ๆ รอบการคำนวณ ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิตที่บัส k ใด ๆ จะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ แถวที่ k หลักที่ k ด้วยค่าแอดมิตแตนซ์รวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิต ดังนี้

$$[Y_{bus}]_{k,k}^{(new)} = [Y_{bus}]_{k,k}^{(old)} + Y_g \quad (3.47)$$

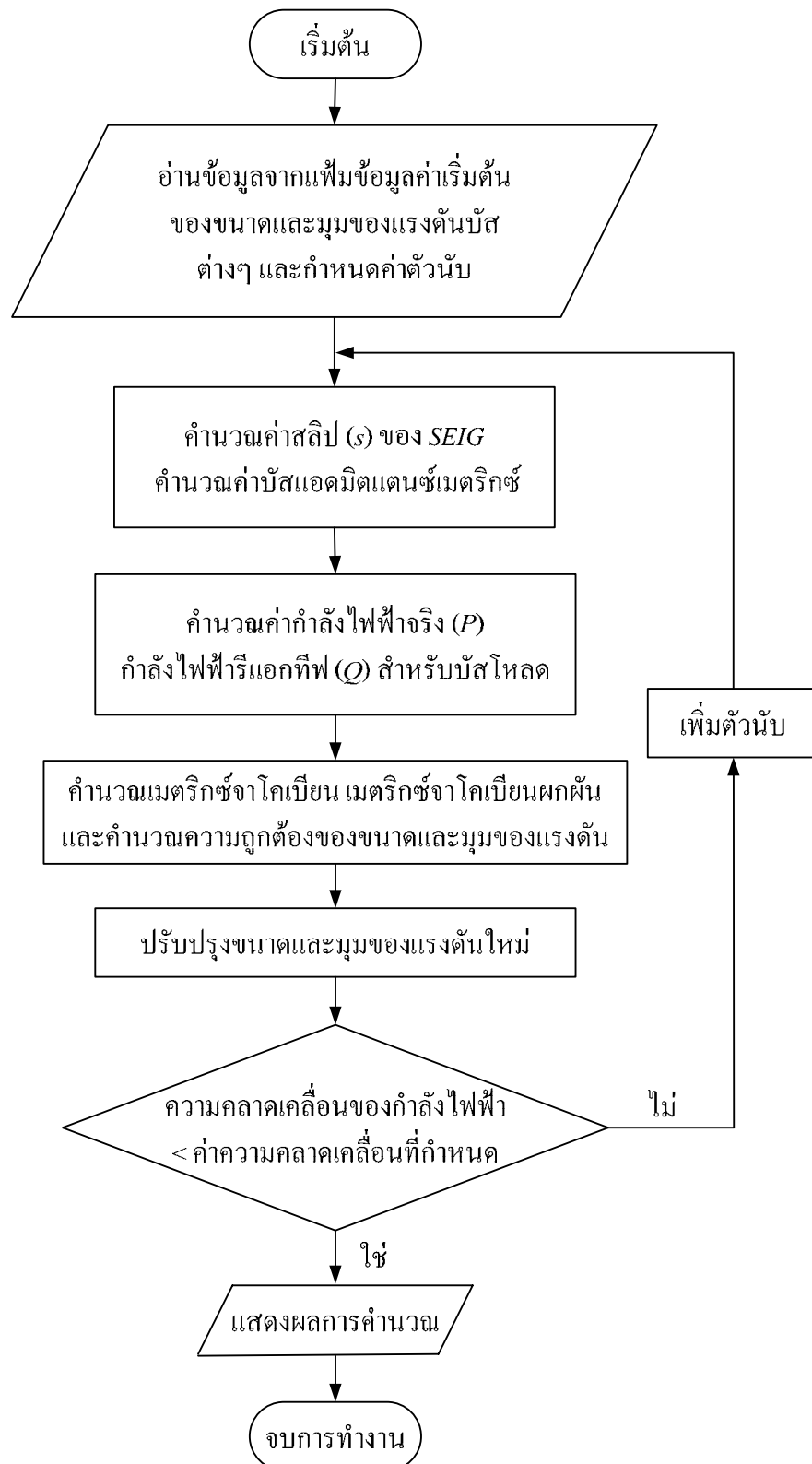
โดยที่ $[Y_{bus}]_{k,k}^{(old)}$ คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบก่อนติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิต

$$Y_g = \frac{sr_2}{r_2^2 + s^2x^2} - j \frac{r_2^2 + s^2x^2 + x_p s^2x}{x_p(r_2^2 + s^2x^2)} \quad (3.48)$$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ดังนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป
- 2) กำหนดค่าเริ่มต้นกำลังไฟฟ้าจริง (P^{SEIG}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบ
- 3) คำนวณค่าสลิป (s) และแอดมิตแตนซ์รวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4) คำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)
- 5) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด
- 6) คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ $J1-J4$ คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ทุกบัส
- 7) คำนวณ δ และ $|V|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ กับค่าเก่า
- 8) ตรวจสอบค่า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่ ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรม ได้ดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองแอดมิตแตนซ์

3.5 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

หัวข้อนี้นำเสนอวิธีการคำนวณผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน ซึ่งจะพิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model) เท่านั้น สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้านในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเริ่มต้นจากสมการความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ หรือเรียกว่า สมการความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches equation) ดังนี้

$$\Delta P_k = P_{sch,k} - P_{cal,k} + \sum_{i=1}^m P_{k,i}^{DFIG} \quad (3.49)$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} + \sum_{i=1}^m Q_{k,i}^{DFIG} \quad (3.50)$$

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

$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.51)$$

$$Q_{cal,k} = -\sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.52)$$

$$P_{k,i}^{DFIG} = \frac{RV_r V_k \cos(\delta - \theta) - sXV_r V_k \sin(\delta - \theta) - sRV_k^2}{R^2 + (sX)^2} \quad (3.53)$$

$$Q_{k,i}^{DFIG} = \frac{RV_r V_k \sin(\delta - \theta) + sXV_r V_k \cos(\delta - \theta) - s^2 X V_k^2}{R^2 + (sX)^2} - \frac{V_k^2}{x_m} \quad (3.54)$$

สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้านในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า พิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกพิจารณาค่าสลิปของ DFIG และแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ และกรณีที่สองพิจารณาค่าสลิปของ DFIG และกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ ดังนี้

3.5.1 พิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่

เมื่อกำหนดค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ พบว่าทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของแรงดัน ดังนี้

$$P^{DFIG} = \frac{RV_r V \cos(\delta - \theta) - sXV_r V \sin(\delta - \theta) - sRV^2}{R^2 + (sX)^2} \quad (3.55)$$

$$Q^{DFIG} = \frac{RV_r V \sin(\delta - \theta) + sXV_r V \cos(\delta - \theta) - s^2 XV^2}{R^2 + (sX)^2} - \frac{V^2}{x_m} \quad (3.56)$$

ดังนั้นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะต้องมีการปรับเปลี่ยนสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ในทุก ๆ รอบการคำนวณ โดยต้องปรับเปลี่ยนค่าเมตริกซ์ย่อยทุกตัวในจาโคเบียนเมตริกซ์ โดยการปรับค่าในจาโคเบียนเมตริกซ์ แสดงได้ดังนี้ เมตริกซ์ย่อย J_1 :

$$\frac{\partial(P_k)^{new}}{\partial\delta_k} = \frac{\partial(P_k)^{old}}{\partial\delta_k} + \frac{\partial(P_k^{DFIG})}{\partial\delta_k} \quad (3.57)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{\partial(P_k)^{old}}{\partial\delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial(P_k^{DFIG})}{\partial\delta_k} = \frac{-RV_r V_k \sin(\delta - \theta) - sXV_r V_k \cos(\delta - \theta)}{R^2 + (sX)^2} \quad (3.59)$$

เมตริกซ์ย่อย J_2 :

$$\frac{\partial(P_k)^{new}}{\partial|V_k|} = \frac{\partial(P_k)^{old}}{\partial|V_k|} + \frac{\partial(P_k^{DFIG})}{\partial|V_k|} \quad (3.60)$$

โดยที่
$$\frac{\partial(P_k)^{old}}{\partial|V_k|} = 2|Y_{k,k}V_k| \cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial(P_k^{DFIG})}{\partial|V_k|} = \frac{RV_r \cos(\delta - \theta) - sXV_r \sin(\delta - \theta) - 2sRV_k}{R^2 + (sX)^2} \quad (3.62)$$

เมตริกซ์ย่อย J_3 :

$$\frac{\partial(Q_k)^{new}}{\partial\delta_k} = \frac{\partial(Q_k)^{old}}{\partial\delta_k} + \frac{\partial(Q_k^{DFIG})}{\partial\delta_k} \quad (3.63)$$

โดยที่
$$\frac{\partial(Q_k)^{old}}{\partial\delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_kV_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial(Q_k^{DFIG})}{\partial\delta_k} = \frac{RV_rV_k \cos(\delta - \theta) - sXV_rV_k \sin(\delta - \theta)}{R^2 + (sX)^2} \quad (3.65)$$

เมตริกซ์ย่อย J_4 :

$$\frac{\partial(Q_k)^{new}}{\partial|V_k|} = \frac{\partial(Q_k)^{old}}{\partial|V_k|} + \frac{\partial(Q_k^{DFIG})}{\partial|V_k|} \quad (3.66)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{\partial(Q_k)^{old}}{\partial|V_k|} = -2|Y_{k,k}V_k|\sin(\theta_{k,k}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i}V_i|\sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (3.67)$$

$$\frac{\partial(Q_k^{DFIG})}{\partial|V_k|} = \frac{RV_r \sin(\delta - \theta) + sXV_r \cos(\delta - \theta) - 2s^2XV_k}{R^2 + (sX)^2} - \frac{2V_k}{x_m} \quad (3.68)$$

สมการที่ (3.57) (3.60) (3.63) และ (3.66) เป็นสมการที่แสดงถึงการเปลี่ยนค่าของเมตริกซ์จาโคเบียน โดยปรับเปลี่ยนค่าเมตริกซ์ย่อยทุกตัวในจาโคเบียนเมตริกซ์

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป

2) กำหนดค่าเริ่มต้นของสลิป (s) และแรงดันโรเตอร์ของ DFIG

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

4) คำนวณกำลังไฟฟ้าจริง (P^{DFIG}) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q^{DFIG}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด

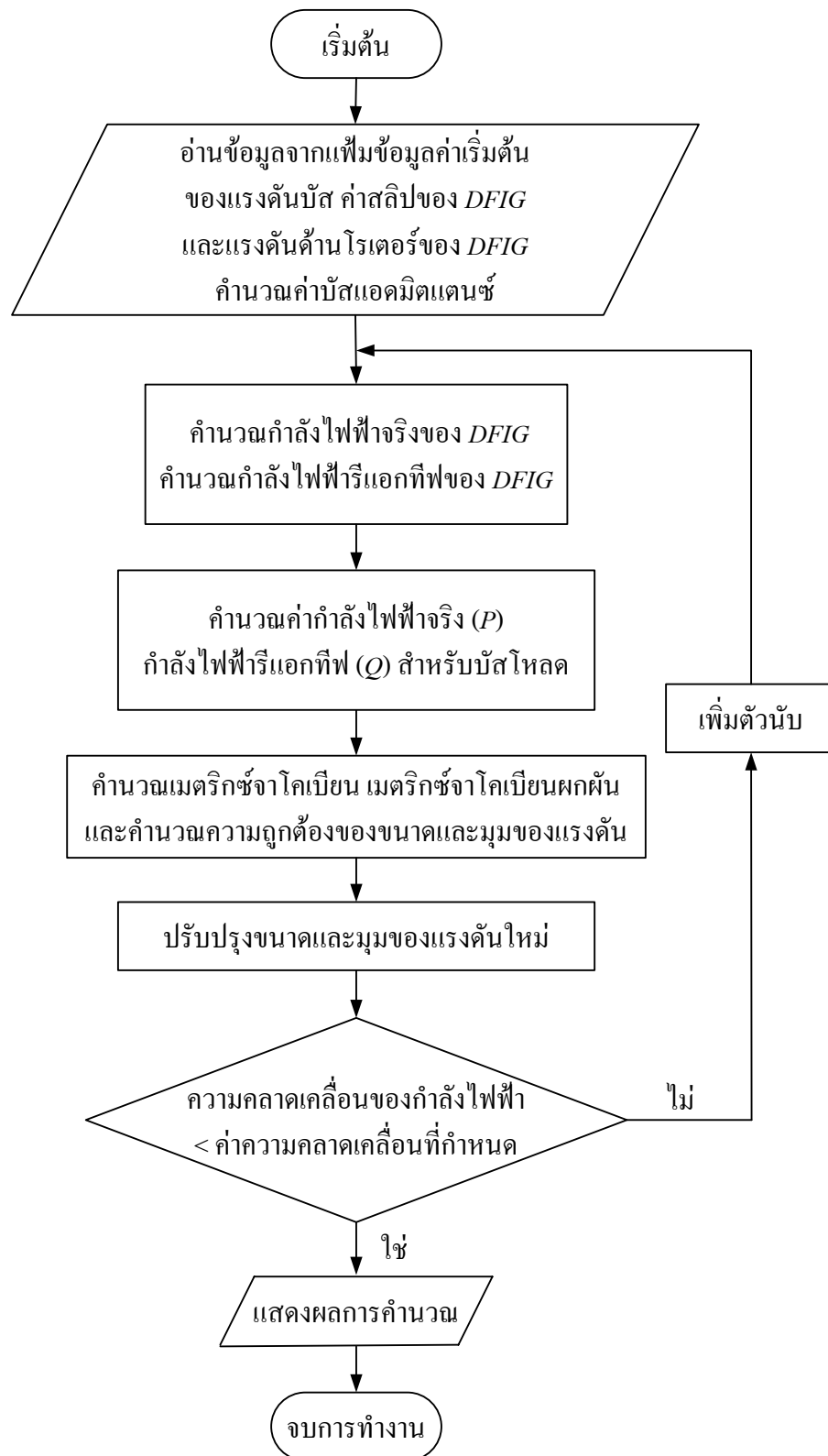
6) คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ J_1-J_4 คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ทุกบัส

7) คำนวณ δ และ $|V|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ กับค่าเก่า

8) ตรวจสอบค่า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่

9) ถ้า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้าน โรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

เมื่อพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่

3.5.2 พิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่

เมื่อกำหนดค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ พบว่าขนาดของแรงดันด้านโรเตอร์และกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_r = \frac{P(R^2 + (sX)^2) + sRV^2}{RV \cos(\delta - \theta) - sXV_r V \sin(\delta - \theta)} \quad (3.69)$$

$$Q^{DFIG} = \frac{RV_r V \sin(\delta - \theta) + sXV_r V \cos(\delta - \theta) - s^2 X V^2}{R^2 + (sX)^2} - \frac{V^2}{x_m} \quad (3.70)$$

สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ต้องปรับเปลี่ยนสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ในทุก ๆ รอบการคำนวณ โดยต้องปรับเปลี่ยนค่าของ $\frac{\partial(Q_k)}{\partial \delta_k}$ ในเมตริกซ์ย่อย $J3$ ดังรายละเอียดตามสมการ (3.63) และปรับเปลี่ยนค่าของ $\frac{\partial(Q_k)}{\partial |V_k|}$ ในเมตริกซ์ย่อย $J4$ ดังรายละเอียดตามสมการ (3.66) ส่วนการคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนในส่วนของเมตริกซ์ย่อย $J1$ และ $J2$ จะเหมือนกับวิธีนิวตัน-ราฟสันรูปแบบปกติในบทที่ 2 ทุกประการ

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป

2) กำหนดค่าเริ่มต้นของสลิป (s) และกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG

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

4) คำนวณค่าแรงดันโรเตอร์และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q^{DFIG}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด

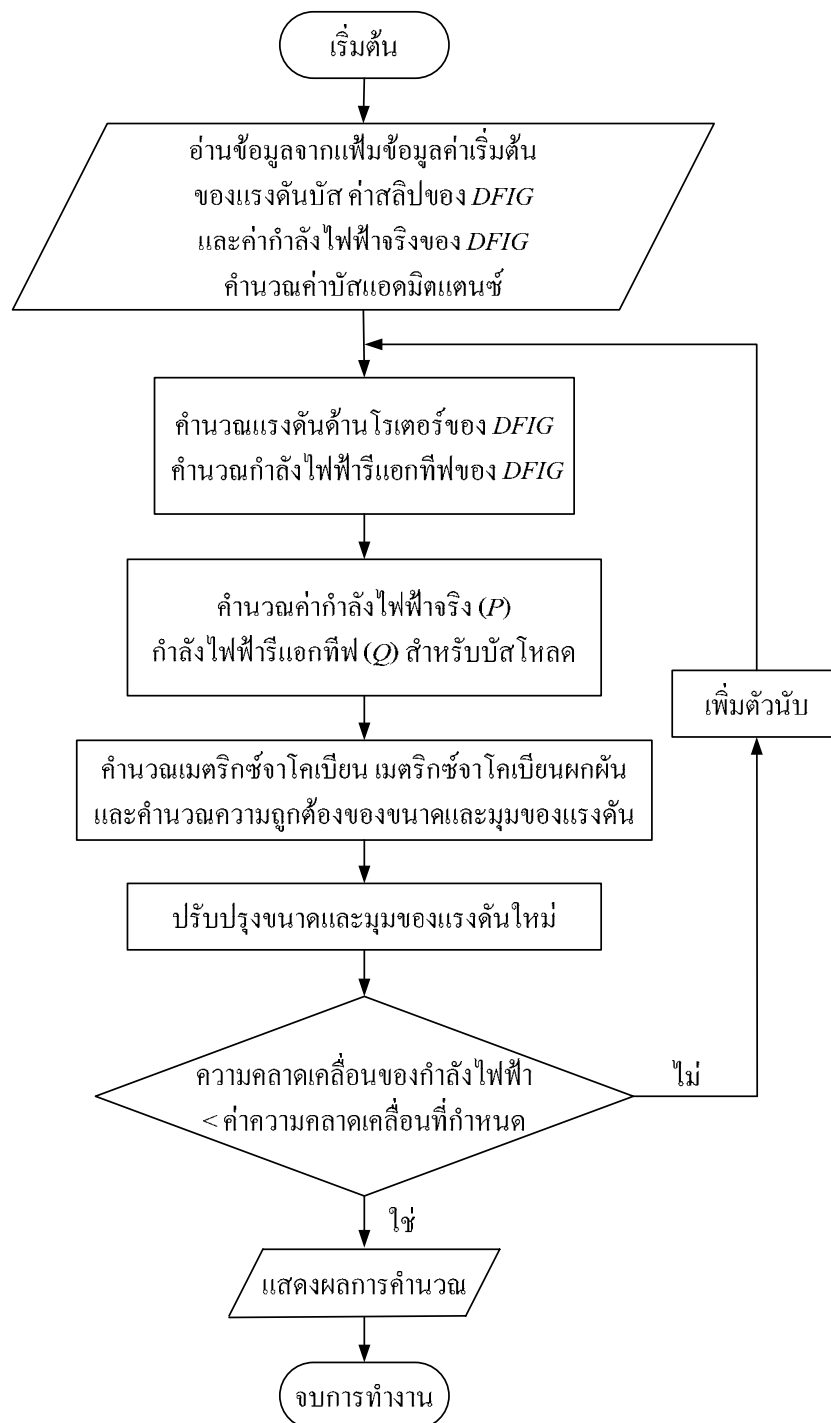
6) คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ $J1$ - $J4$ คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ ทุกบัส

7) คำนวณ δ และ $|V|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ กับค่าเก่า

8) ตรวจสอบค่า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta \delta$ และ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่

9) ถ้า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta \delta$ และ $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

เมื่อพิจารณาค่าสลลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่

3.6 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน การทดสอบแบ่งออก

เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของการติดตั้ง SEIG กับผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้า ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของการติดตั้ง DFIG กับผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยในแต่ละส่วนจะเป็นการศึกษาผลของการติดตั้งกับผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าและคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย โดยทั้ง 2 ส่วน ทดสอบกับระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส 85 บัส และ 131 บัส โดยระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบทดสอบสายป้อนแบบ 3 เฟสสมมูล ค่าฐานเท่ากับ 100 kVA ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

3.6.1 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ SEIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ทำการทดสอบโดยการติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดย SEIG ทุกตัวที่ถูกติดตั้งในระบบไฟฟ้า มีค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง

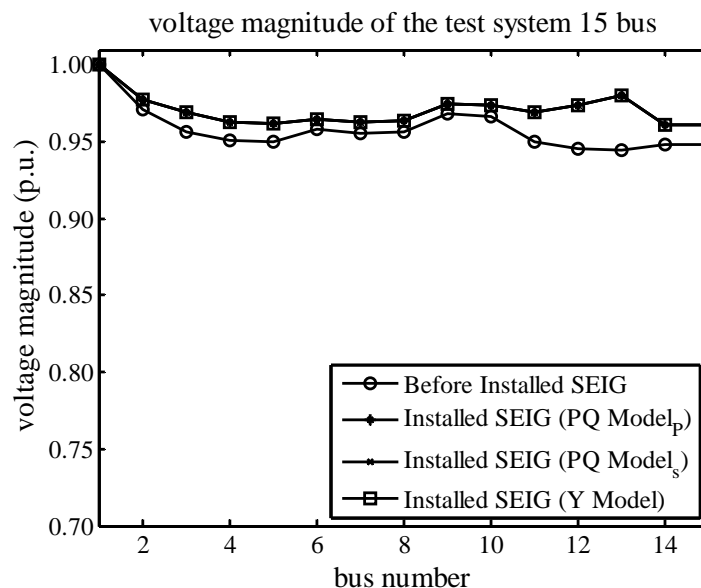
พารามิเตอร์	x_1	x_2	r_2	x_m	x_c
ค่า (p.u.)	0.09985	0.10906	0.00373	3.54708	0.1318

จากนั้นหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG และเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าที่ได้โดยพิจารณาแบบจำลองของ SEIG ทั้ง 2 แบบจำลอง แบบจำลองแรกได้แก่แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาทั้งแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่และแบบสลลิปคงที่ ส่วนแบบจำลองที่สองคือแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ การทดสอบได้กำหนดเงื่อนไขการหยุดไว้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมรับได้หรือค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 1×10^{-6} p.u. ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบทุกกรณี สำหรับจุดเริ่มต้นของการคำนวณได้ใช้จุดเริ่มต้นเดียวกัน โดยกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นมีค่า $1.00+j0.00$ p.u. สำหรับทุก ๆ บัส ผลทดสอบเป็นดังนี้

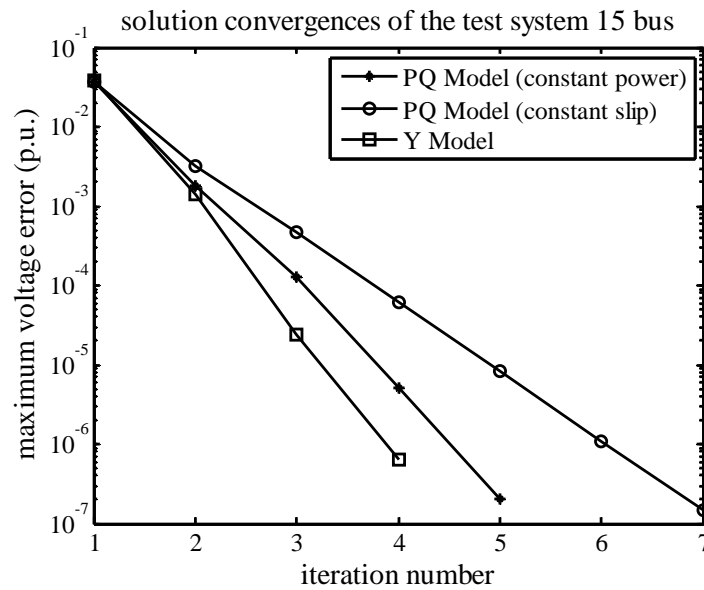
1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 15 บัส ทดลองติดตั้ง SEIG ขนาด 200 kW (2.00 p.u.) ในระบบที่บัสที่ 13 ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 200 kW กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 358.45 kVAR และสลลิป 3.07% พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 15 บัส ที่แสดงในรูปที่ 3.9 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาแบบจำลอง SEIG ทั้ง 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาทั้งแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่และแบบสลลิปคงที่ และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่าการติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้าช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 61.7944 kW ลดลงเป็น 40.1684 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 34.9967% พิจารณาการรู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส ในรูปที่ 3.10 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อติดตั้ง SEIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการพิจารณา SEIG ด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์มีคุณสมบัติการรู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณา SEIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า



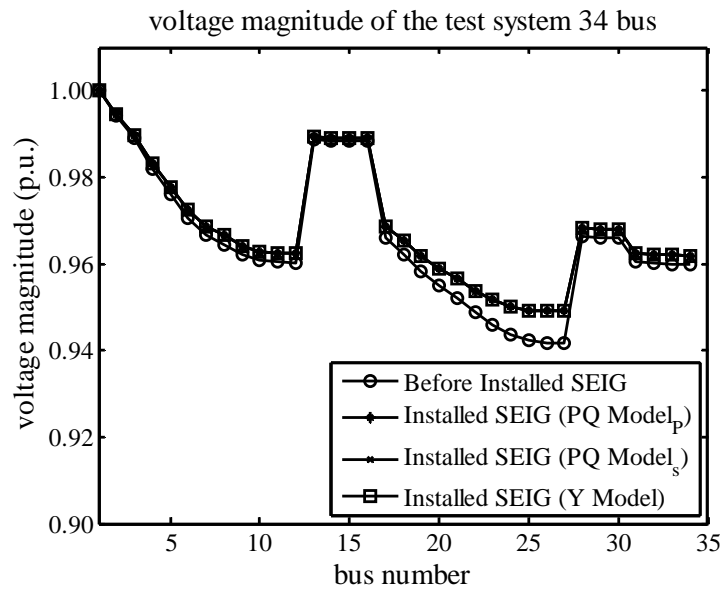
รูปที่ 3.9 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส



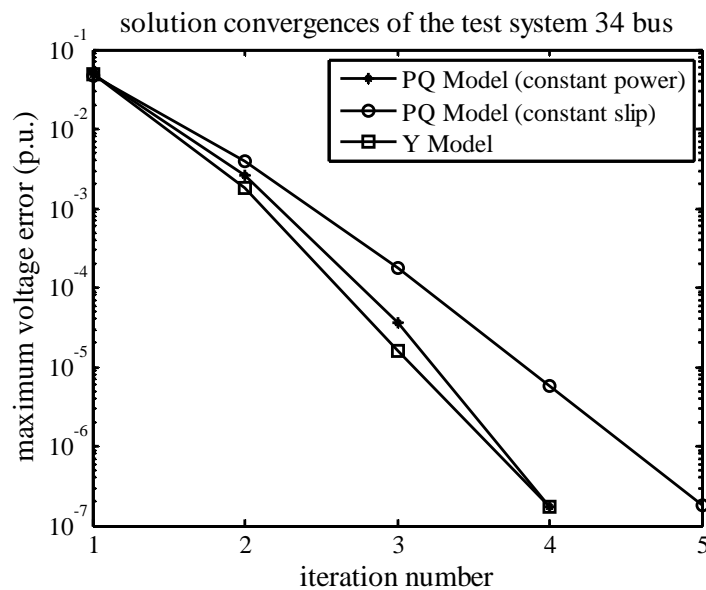
รูปที่ 3.10 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 34 บัส ทดลองติดตั้ง SEIG ขนาด 200 kW (2.00 p.u.) ในระบบที่บัส 27 จะได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 และคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 200 kW กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 361.93 kVAR และสลิป 2.64% พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 34 บัสที่แสดงในรูปที่ 3.11 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง SEIG เพิ่มในระบบไฟฟ้าเมื่อพิจารณาแบบจำลอง SEIG ทั้ง 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาทั้งแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่และแบบสลิปคงที่ และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน และเมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 221.7235 kW ลดลงเป็น 180.0127 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 18.8121% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส ในรูปที่ 3.12 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อติดตั้ง SEIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการพิจารณา SEIG ด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.11 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส

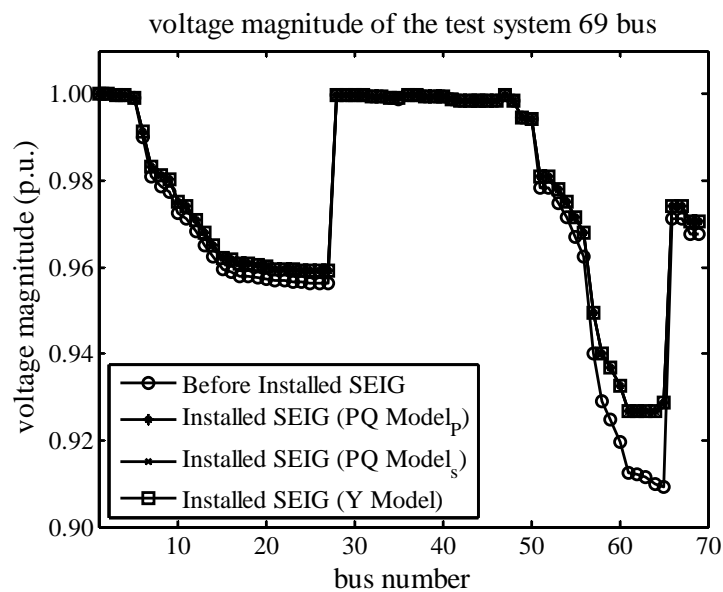


รูปที่ 3.12 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส

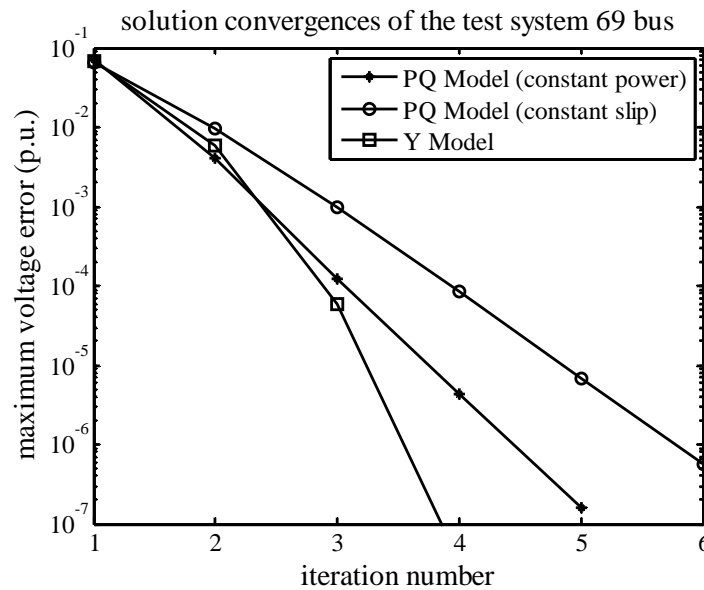
3) ระบบทดสอบ 69 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 69 บัส ทดลองติดตั้ง SEIG ขนาด 200 kW (2.00 p.u.) ในระบบที่บัส 65 จะได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย

แสดงได้ดังรูปที่ 3.14 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 200 kW กำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ 372.50 kVAR และสลิป 2.30% พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 69 บัสที่แสดงในรูปที่ 3.13 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบเมื่อพิจารณาแบบจำลอง SEIG ทั้ง 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาทั้งแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่และแบบสลลิปคงที่ และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 225.0028 kW ลดลงเป็น 160.0222 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 28.8799% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส ในรูปที่ 3.14 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อติดตั้ง SEIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการพิจารณา SEIG ด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า



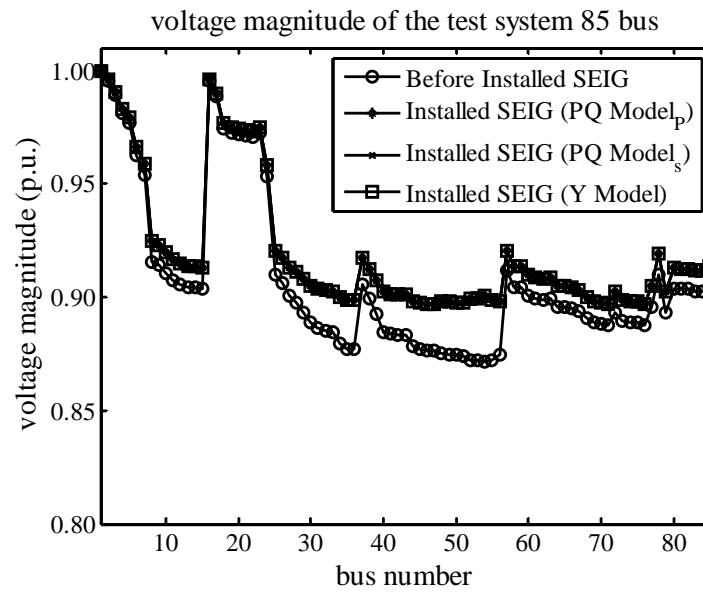
รูปที่ 3.13 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส



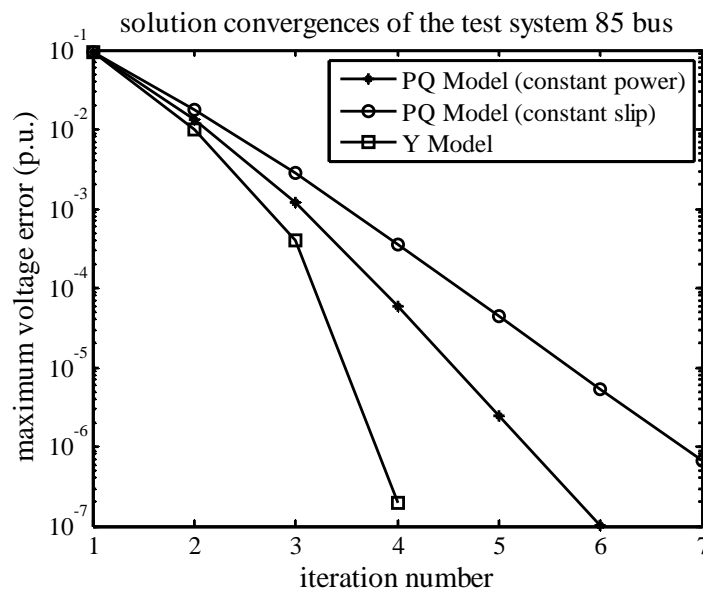
รูปที่ 3.14 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 85 บัส ทดลองติดตั้ง SEIG ขนาด 150 kW (1.50 p.u.) ในระบบที่บัส 54 จะได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 150 kW กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 275.1895 kVAR ค่าสลิป 3.78% พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 85 บัสที่แสดงในรูปที่ 3.15 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบเมื่อพิจารณาแบบจำลอง SEIG ทั้ง 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาทั้งแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่และแบบสลิปคงที่ และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน และเมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 315.7013 kW ลดลงเป็น 241.0716 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 23.6393% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส ในรูปที่ 3.16 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อติดตั้ง SEIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการพิจารณา SEIG ด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.15 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส

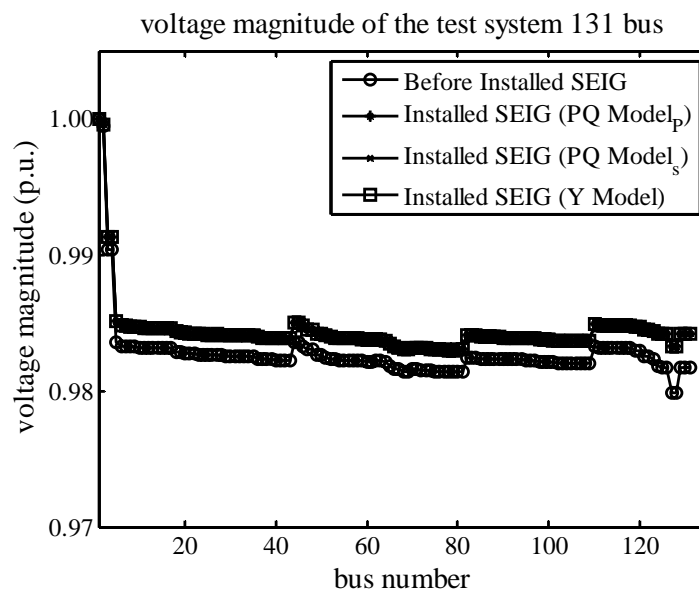


รูปที่ 3.16 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส

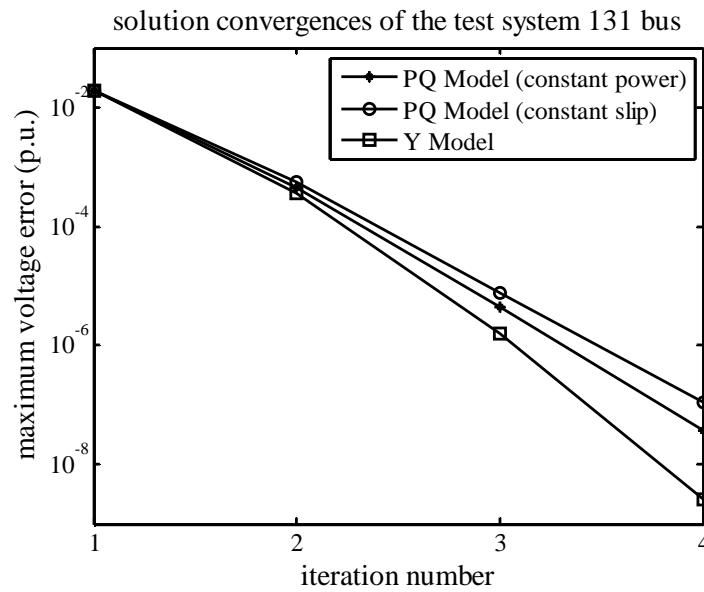
5) ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 131 บัส เมื่อทดลองติดตั้ง SEIG ขนาด 150 kW (1.50 p.u.) ในระบบที่บัส 128 ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 และคุณสมบัติการลู่เข้า

ของผลเฉลย แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 150 kW กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 298.7038 kVAR สลิป 4.85% พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 131 บัส ในรูปที่ 3.17 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบ เมื่อพิจารณาแบบจำลองของ SEIG ทั้ง 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาทั้งแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ แบบสลลิปคงที่ และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่าการติดตั้ง SEIG เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า จะช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้ง 45.6667 kW ลดลงเป็น 39.0584 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 14.4707% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส ในรูปที่ 3.18 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อติดตั้ง SEIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการพิจารณา SEIG ด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ 3.18 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง SEIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส

3.6.2 ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของ DFIG ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ทำการทดสอบโดยการติดตั้ง DFIG เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า โดย DFIG ทุกตัวที่ถูกติดตั้งในระบบมีค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.2

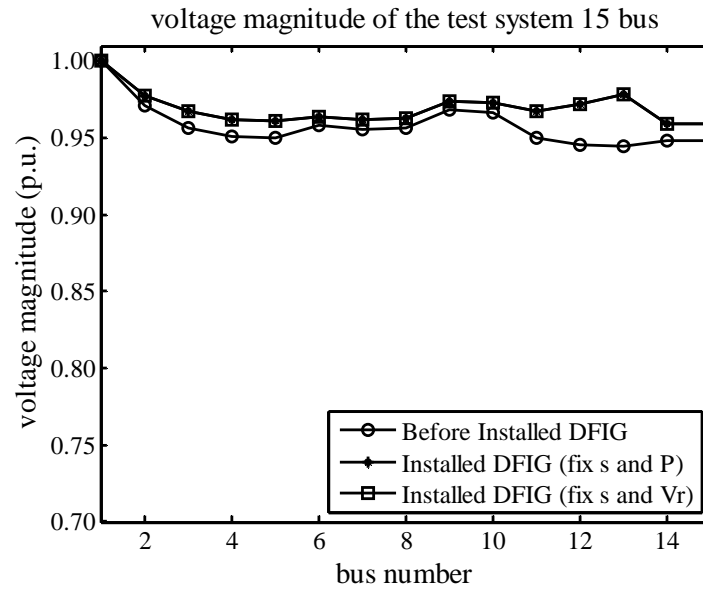
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน

พารามิเตอร์	r_1	r_2	x_1	x_2	x_m
ค่า (p.u.)	0.0108	0.0121	0.1025	0.1100	3.3620

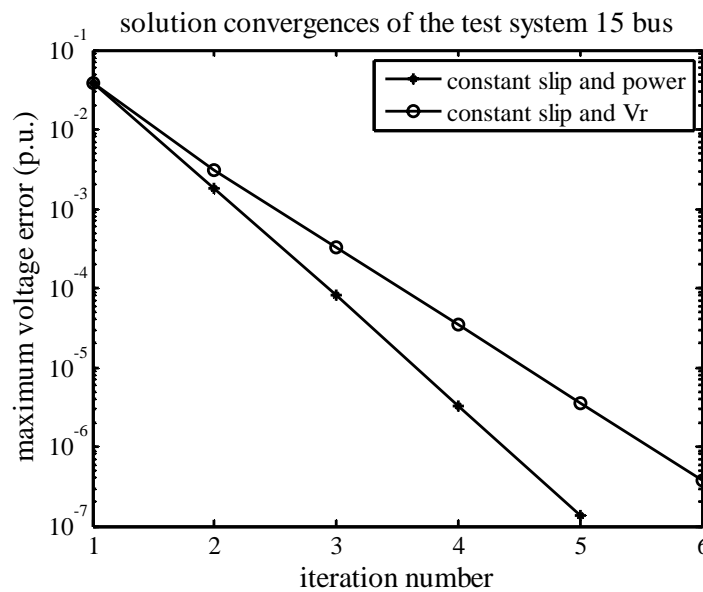
จากนั้นหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG และเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าที่ได้โดยพิจารณาแบบจำลองของ DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาทั้ง 2 กรณี กรณีแรกพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้าน โรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ กรณีที่สองพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ การทดสอบกำหนดเงื่อนไขการหยุดไว้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมรับได้ หรือค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 1×10^{-6} p.u. ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบทุกกรณี สำหรับจุดเริ่มต้นของการคำนวณได้ใช้จุดเริ่มต้นเดียวกัน โดยกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นมีค่า $1.00 + j0.00$ p.u. สำหรับทุกบัส ผลทดสอบเป็นดังนี้

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 15 บัส เมื่อทดลองติดตั้ง DFIG ขนาด 300 kW (3.00 p.u.) ค่าสลิป 3.00% ในระบบที่บัส 13 จะได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย แสดงได้ดังรูปที่ 3.20 จุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 300 kW กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 189.98 kVAR ค่าสลิป 3.00% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0173 p.u. พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 15 บัส ในรูปที่ 3.19 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง DFIG เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้า เมื่อพิจารณาแบบจำลอง DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 กรณี กรณีแรกพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ และกรณีที่สองพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง DFIG เพิ่มเติมในระบบ จะช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 61.7944 kW ลดลงเป็น 41.1577 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 33.3957% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส ดังที่แสดงในรูปที่ 3.20 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อติดตั้ง DFIG โดยการพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าการพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ ดังนั้นการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่



รูปที่ 3.19 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส

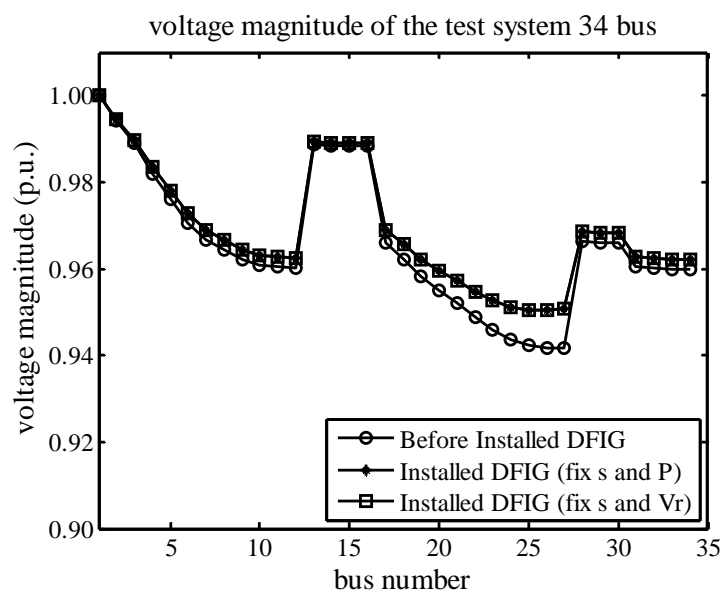


รูปที่ 3.20 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 13 ในระบบทดสอบ 15 บัส

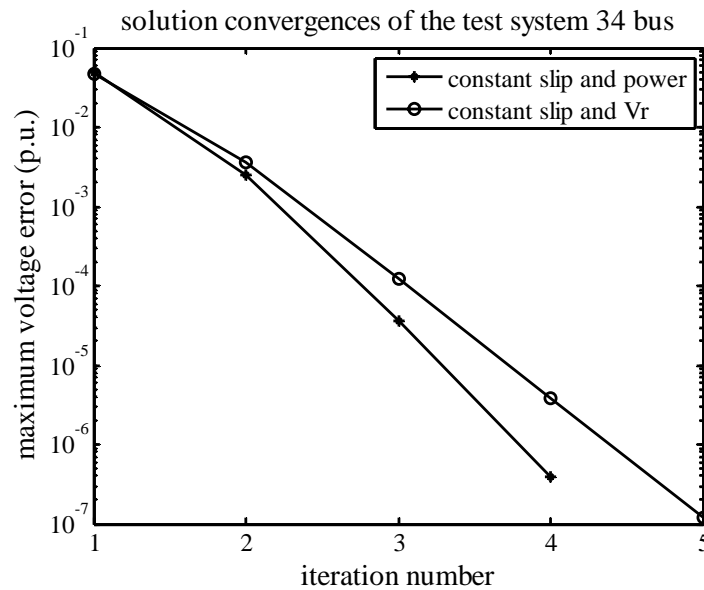
2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 34 บัส ทดลองติดตั้ง DFIG ขนาด 300 kW (3.00 p.u.) ค่าสลลิป 3.00% ในระบบที่บัส 27 จะได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงดังรูปที่ 3.21 คุณสมบัติการลู่เข้า

ของผลเฉลย แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 300 kW กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 187.04 kVAR ค่าสลิป 3.00% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0194 p.u. พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 34 บัส ในรูปที่ 3.21 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง DFIG เพิ่มเติมในระบบ เมื่อพิจารณาแบบจำลอง DFIG เป็นแบบจำลองกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 กรณี กรณีแรกพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ และกรณีที่สองพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง DFIG เพิ่มเติมในระบบ จะช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 221.7235 kW ลดลงเป็น 179.4431 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 19.0690% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยของการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส ในรูปที่ 3.22 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเมื่อติดตั้ง DFIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่า การพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ ดังนั้นการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่



รูปที่ 3.21 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส

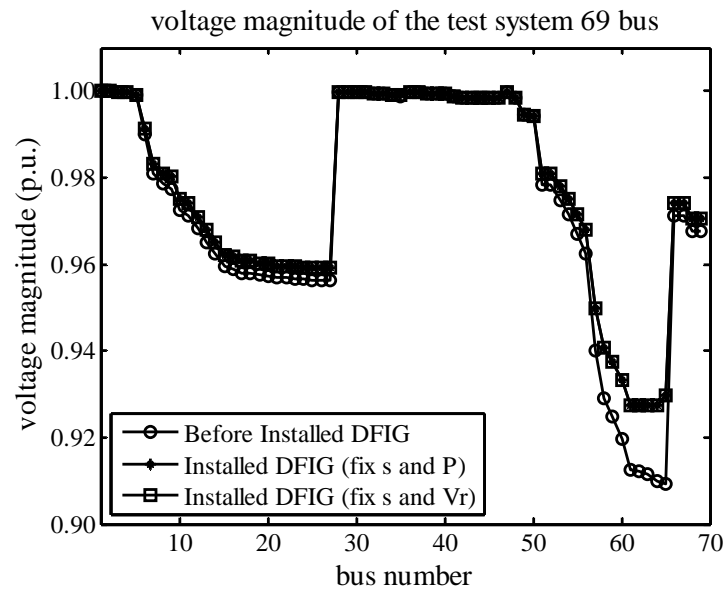


รูปที่ 3.22 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 27 ในระบบทดสอบ 34 บัส

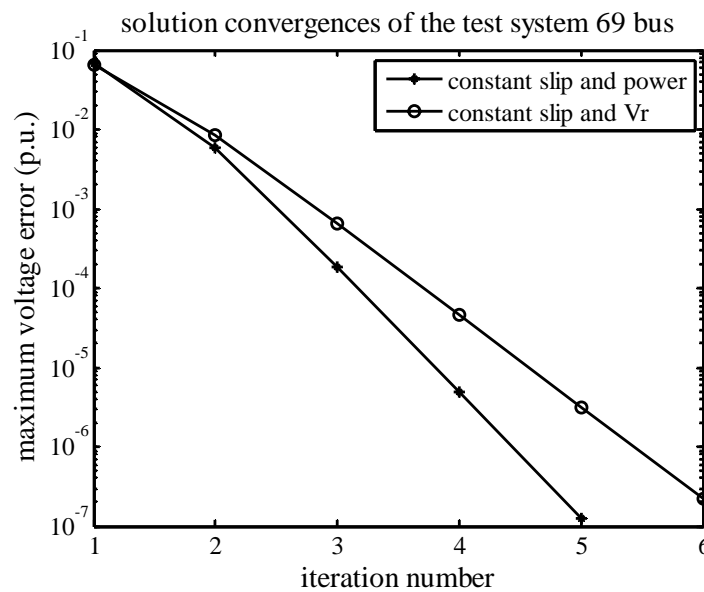
3) ระบบทดสอบ 69 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 69 บัส เมื่อทดลองติดตั้ง DFIG ขนาด 300 kW (3.00 p.u.) ค่าสลิป 3.00% ในระบบที่บัส 65 จะได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงดังรูปที่ 3.23 คุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย แสดงได้ดังรูปที่ 3.24 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 300 kW กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 185.2866 kVAR ค่าสลิป 3.00% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0211 p.u. พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 69 บัส ในรูปที่ 3.23 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง DFIG เพิ่มขึ้นในระบบ เมื่อพิจารณาแบบจำลอง DFIG เป็นแบบจำลองกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 กรณี กรณีแรกพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ และกรณีที่สองพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง DFIG เพิ่มขึ้นในระบบ จะช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 225.0028 kW ลดลงเป็น 161.7295 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 28.1211% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยของการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส ในรูปที่ 3.24 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเมื่อติดตั้ง DFIG โดยที่พิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่า

การพิจารณาค่าสลลิปและแรงดันด้าน โรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ ดังนั้นการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่



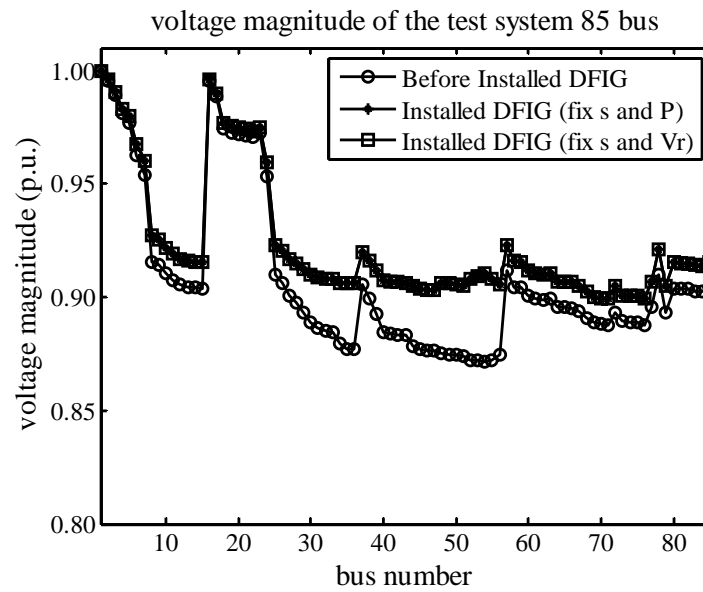
รูปที่ 3.23 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส



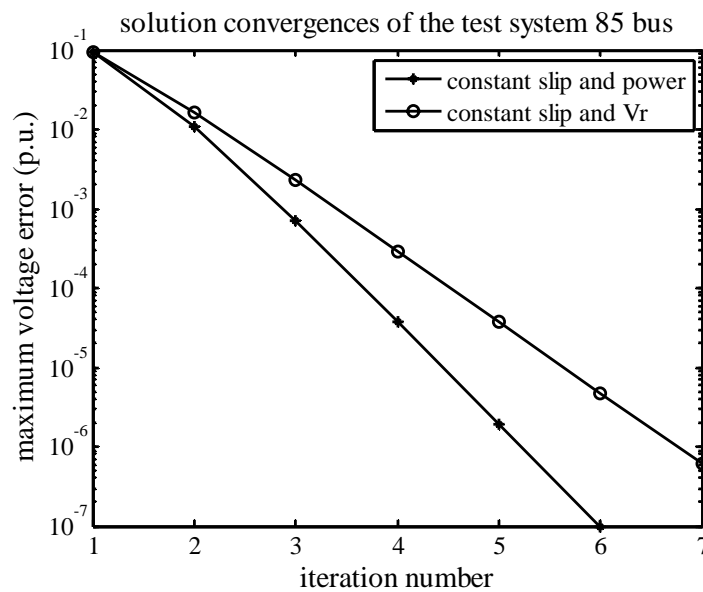
รูปที่ 3.24 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 65 ในระบบทดสอบ 69 บัส

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 85 บัส เมื่อทดลองติดตั้ง DFIG ขนาด 300 kW (3.00 p.u.) ค่าสลิป 3.00% ในระบบที่บัส 54 จะได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงดังรูปที่ 3.25 คุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย แสดงได้ดังรูปที่ 3.26 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 300 kW กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 181.5788 kVAR ค่าสลิป 3.00% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0225 p.u. พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 85 บัส ในรูปที่ 3.25 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง DFIG เพิ่มขึ้นในระบบ เมื่อพิจารณาแบบจำลอง DFIG เป็นแบบจำลองกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 กรณี กรณีแรกพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ และกรณีที่สองพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง DFIG เพิ่มขึ้นในระบบ จะช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 315.7013 kW ลดลงเป็น 232.6877 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 26.2950% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยของการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส ในรูปที่ 3.26 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเมื่อติดตั้ง DFIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่า การพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ ดังนั้นการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่



รูปที่ 3.25 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส

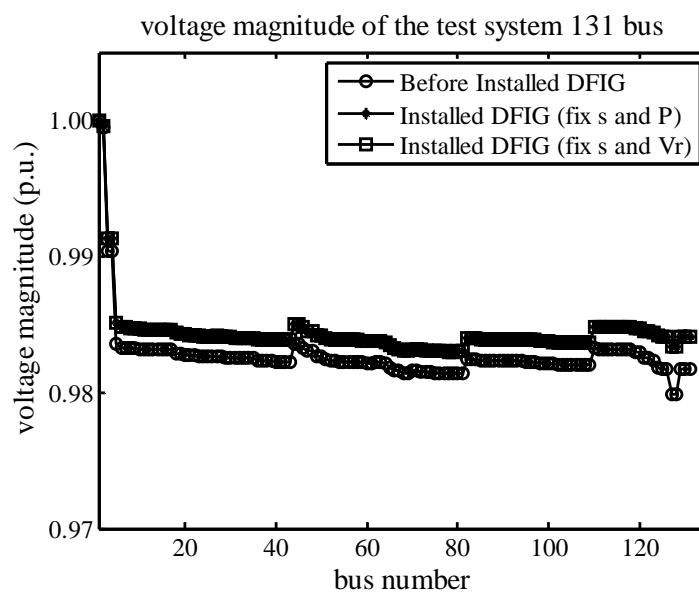


รูปที่ 3.26 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 54 ในระบบทดสอบ 85 บัส

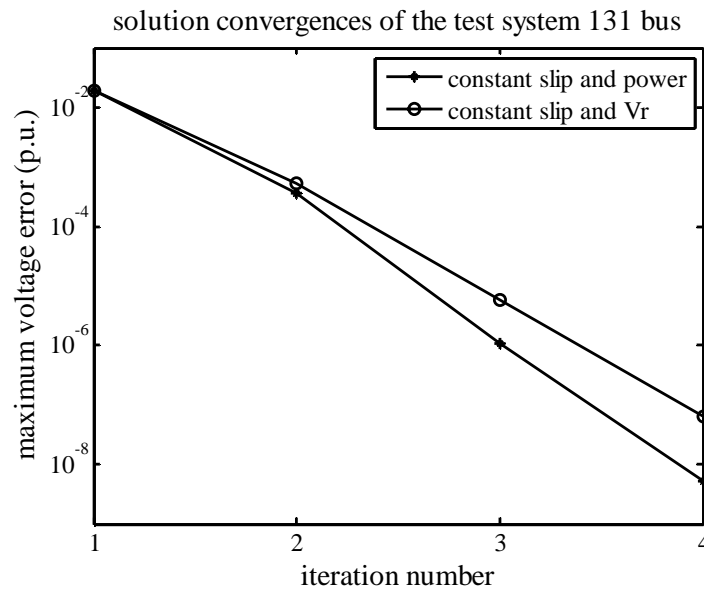
5) ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

ผลการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กรณีระบบทดสอบ 131 บัส เมื่อทดลองติดตั้ง DFIG ขนาด 300 kW (3.00 p.u.) ค่าสลิป 3.00% ในระบบที่บัส 128 ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงดังรูปที่ 3.27 คุณสมบัติการลู่เข้า

ของผลเฉลย แสดงได้ดังรูปที่ 3.28 และจุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG คือ กำลังไฟฟ้าจริง 300 kW กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 192.4079 kVAR ค่าสลิป 3.00% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0170 p.u. พิจารณาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 131 บัส ในรูปที่ 3.27 จะเห็นว่า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้ง DFIG เพิ่มเติมในระบบ เมื่อพิจารณาแบบจำลอง DFIG เป็นแบบจำลองกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 กรณี กรณีแรกพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ และกรณีที่สองพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าเดียวกัน เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นว่า การติดตั้ง DFIG เพิ่มเติมในระบบ จะช่วยทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 45.6667 kW ลดลงเป็น 37.0902 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 18.7806% พิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยของการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส ในรูปที่ 3.28 จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเมื่อติดตั้ง DFIG โดยพิจารณาด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่า การพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่ ดังนั้นการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เป็นค่าคงที่ มีคุณสมบัติการลู่เข้าที่เร็วกว่าการพิจารณา DFIG ด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสลิปและแรงดันด้านโรเตอร์ของ DFIG เป็นค่าคงที่



รูปที่ 3.27 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ 3.28 การลู่เข้าของผลเฉลยการทดสอบติดตั้ง DFIG ที่บัส 128 ในระบบทดสอบ 131 บัส

3.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองในสถานะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเสนอกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองชนิด คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง (self-excited induction generator: SEIG) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน (doubly-fed induction generator: DFIG) ซึ่งได้กล่าวถึงแบบจำลองสองแบบ ได้แก่แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งกล่าวถึงสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ซึ่งกล่าวถึงการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ เนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบ ส่งผลให้เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย รวมถึงการหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองในสถานะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองชนิด และทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอ โดยทดสอบกับระบบทดสอบ 5 ระบบ โดยการกำหนดตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบ จากนั้นหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าที่ได้ ลำดับต่อมาศึกษาผลของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยสำหรับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละชนิด เพื่อให้เห็น

ข้อดีของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าชัดเจนมากยิ่งขึ้นจึงได้นำเสนอการหาดำแหน่งติดตั้งและขนาดติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 และบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 4

ตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

4.1 บทนำ

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นการดำเนินการโดยยึดหลักของประสิทธิภาพโดยรวมและประหยัด ดังนั้น การกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมและขนาดที่พอเหมาะจะช่วยให้โหลดส่วนใหญ่ของระบบได้รับการป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบในภาพรวม ปัญหาการกำหนดขนาดที่เหมาะสมเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดรูปแบบหนึ่ง การแก้ปัญหามีกระบวนการที่แน่นอนและอัลกอริทึมที่ชัดเจน เช่น การโปรแกรมลำดับควอดราติก (SQP) ในส่วนของการหาตำแหน่งติดตั้งเป็นประเด็นที่ละเอียดอ่อนและต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยพิจารณาเป็นสองกรณี กรณีแรกพิจารณาดำเนินการติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสโหลดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพมากที่สุด ในรูปของการประเมินบัสอ่อนแอ (weak bus evaluation) ด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม กรณีที่สองพิจารณาดำเนินการติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด การค้นหาดำเนินการบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

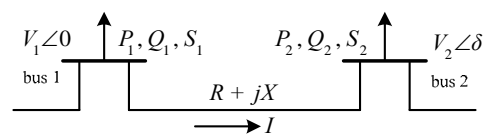
4.2 การค้นหาดำเนินการบัสที่อ่อนแอโดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

การเพิ่มโหลดรีแอกทีฟอย่างช้า ๆ ที่จุดโหลดใด ๆ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสนั้นลดต่ำลง เมื่อการเพิ่มขึ้นของโหลดรีแอกทีฟเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แรงดันบัสจะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน อย่างไรก็ตามการลดลงของแรงดันมีค่าจำกัด เมื่อเกินค่าแรงดันพังทลายจะส่งผลให้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าไม่ลู่เข้า ขอบเขตสามารถวัดได้จากผลเฉลยค่าฐานมากที่สุดของจุดที่ลู่เข้าหาคำตอบในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่าโหลดมากที่สุดของแต่ละบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลเฉลยที่เป็นไปได้ของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ก่อนที่ระบบไฟฟ้ากำลังจะถึงจุดการพังทลายของแรงดัน (voltage collapse) สามารถหาค่าโหลดมากที่สุดได้จากลักษณะพื้นฐาน

2 ข้อ คือ เงื่อนไขบังคับสมการและอสมการ งานวิจัยส่วนใหญ่ยอมรับว่าค่าการจ่ายโหลดสูงสุดขึ้นอยู่กับค่าการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า โดยการตรวจสอบความเป็นเมตริกซ์เอกฐาน (singular matrix) ของเมตริกซ์จาโคเบียน ทำให้ประเมินค่าการจ่ายโหลดสูงสุดที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันสามารถทำได้โดยพิจารณาจากพฤติกรรมของดัชนีเสถียรภาพของสายจำหน่าย เพื่อระบุสายจำหน่ายที่มีความเครียดสูงที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง ดัชนีนี้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันบัสต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟัรีแอกทีฟที่บัสนั้น ๆ อัตราส่วนดังกล่าวนำเสนอความไวของแรงดันบัสต่อการชดเชยกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ ซึ่งสัมพันธ์กับเสถียรภาพและการพังทลายของแรงดันในระบบ บัสที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์สูง จะเรียกว่า บัสที่อ่อนแอ (weak bus) งานวิจัยนี้จะนำเสนอดัชนีที่ใช้ระบุตำแหน่งบัสที่อ่อนแอในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า คือ ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว FVSI ดังนี้

4.2.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว FVSI

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว (Fast Voltage Stability Index: FVSI) สามารถคำนวณได้จากสมการกระแสที่ไหลผ่านสายส่งระหว่างบัส 2 บัส ดังรูปที่ 4.1 (Musirin and Abdul Rahman, 2002)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

V_1, V_2 คือ แรงดันที่บัสส่งและบัสรับ

P_1, Q_1 คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟัรีแอกทีฟที่บัสส่ง

P_2, Q_2 คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟัรีแอกทีฟที่บัสรับ

S_1, S_2 คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของบัสส่งและบัสรับ

δ คือ $\delta_1 - \delta_2$ ความแตกต่างของมุมแรงดันระหว่างบัสส่งและบัสรับ

โดยกำหนดให้บัสส่งเป็นบัสอ้างอิง ($\delta_1 = 0$ และ $\delta_2 = \delta$) แล้วจะได้สมการกระแสทั่วไปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} \quad (4.1)$$

เมื่อ R เป็นความต้านทานของสายส่ง และ X เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่ง กำลังไฟฟ้าปรากฏที่บัสรับมีค่าเท่ากับ

$$S_2 = V_2 I^* \quad (4.2)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$I = \left(\frac{S_2}{V_2} \right)^* = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \quad (4.3)$$

สมการที่ (4.1) และ (4.3) เท่ากันดังนี้

$$\frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \quad (4.4)$$

$$(V_1 V_2 \angle -\delta) - (V_2^2 \angle 0) = (R + jX)(P_2 - jQ_2) \quad (4.5)$$

แยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของสมการที่ (4.5) ได้ดังนี้

$$V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 = R P_2 + X Q_2 \quad (4.6)$$

$$-V_1 V_2 \sin \delta = X P_2 - R Q_2 \quad (4.7)$$

จัดรูปสมการที่ (4.7) เพื่อหาค่า P_2 จะได้

$$P_2 = \frac{R Q_2}{X} - \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \quad (4.8)$$

แทนสมการที่ (4.8) ในสมการที่ (4.6) จะได้

$$V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 = R \left(\frac{R Q_2}{X} - \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \right) + X Q_2 \quad (4.9)$$

$$V_2^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 V_2 + \left(\frac{R^2}{X} + X \right) Q_2 = 0 \quad (4.10)$$

คำตอบของสมการที่ (4.10) คือ

$$V_2 = \frac{\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X} \right) Q_2}}{2} \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.11) คำตอบของ V_2 จะเป็นค่าจริงก็ต่อเมื่อ พจน์ในรากที่สองจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X} \right) Q_2 \geq 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{(V_1)^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \leq 1 \quad (4.13)$$

กำหนดให้ δ มีค่าน้อยมากจะได้ $\delta \approx 0$

ดังนั้น $R \sin \delta \approx 0$ และ $X \cos \delta \approx X$

กำหนดให้ 1 เป็นบัสส่งกำลังไฟฟ้าและ 2 เป็นบัสรับกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจะได้ FVSI ดังนี้

$$FVSI_{12} = \frac{4Z^2 Q_2}{V_1^2 X} \quad (4.14)$$

โดยที่ Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

X คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง

Q_2 คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสรับ

V_l คือ แรงดันที่บัสส่ง

ค่าของดัชนี FVSI จะมีขอบเขตที่ 1.00 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความไม่มีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ถ้า FVSI มีค่าเป็น 1.00 แรงดันที่บัสรับปลายสายส่งจะลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่อความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้ากำลังตามมา

4.3 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม

การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ดังนี้

4.3.1 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม

ขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถเขียนเป็นสมการปัญหาที่เหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (4.15)

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && P_{loss} \\
 &\text{subject to} && P_{g,i}^{min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{max} \quad \text{kW} \\
 &&& Q_{g,i}^{min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{max} \quad \text{kVar} \\
 &&& slip_{g,i}^{min} \leq slip_{g,i} \leq slip_{g,i}^{max}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบ

$P_{g,i}^{min}$ คือ ขนาดของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$P_{g,i}^{max}$ คือ ขนาดของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$Q_{g,i}^{min}$ คือ ขนาดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$Q_{g,i}^{max}$ คือ ขนาดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$slip_{g,i}^{min}$ คือ ค่าสลลิปต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$slip_{g,i}^{max}$ คือ ค่าสลลิปสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

4.3.2 จินเนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น

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

1) การรีโพรดักชัน (reproduction)

เนื่องจากโครโมโซมแต่ละชุดมีโอกาสในการอยู่รอดได้ไม่เท่ากัน ดังนั้น กระบวนการรีโพรดักชันจึงเป็นกระบวนการคัดเลือกโครโมโซมจากกลุ่มประชากรที่มีความเหมาะสมสูงเพื่อนำมาเป็นชุดคำตอบเริ่มต้นให้กับกลุ่มประชากรรุ่นต่อไปโดยอาศัยทฤษฎีการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่เรียกว่า ค่าความฟิต (fitness value) ซึ่งโดยทั่วไปประเมินได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือปริมาณอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2) การครอสโอเวอร์ (crossover)

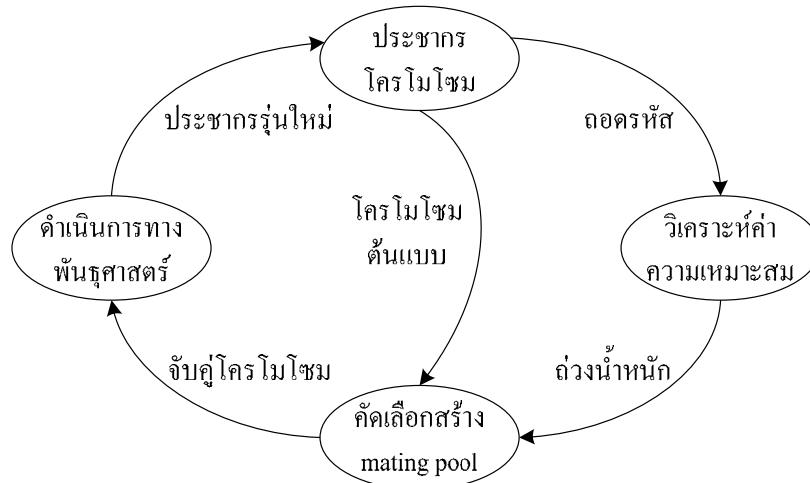
เป็นขั้นตอนที่ทำภายหลังการรีโพรดักชัน โดยการแลกเปลี่ยนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (parent) ตามอัตราความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (probability of crossover) เพื่อสร้างชุดโครโมโซมรุ่นใหม่หรือโครโมโซมรุ่นลูก (offspring) อัตราการครอสโอเวอร์ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการหาคำตอบของจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งก็คืออัตราส่วนของจำนวนโครโมโซมลูกที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละรุ่นต่อขนาดขอ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

3) การผ่าเหล่า (mutation)

เป็นขั้นตอนที่อาจช่วยให้โครโมโซมมีความเหมาะสมดีขึ้นหลังจากการครอสโอเวอร์ โดยการปรับเปลี่ยนข้อมูลบางส่วนของโครโมโซมเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ตามอัตราส่วนความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (probability of mutation) ที่กำหนด อัตราการมิวเตชันหมายถึง เปอร์เซ็นต์ของจำนวนยีนทั้งหมดในประชากรที่จะเกิดการมิวเตชันขึ้น โดยปกติแล้ว จินเนติกอัลกอริทึมจะยอมให้การผ่าเหล่าเกิดขึ้นได้น้อยมากเพียง 1-2% เท่านั้น

จินเนติกอัลกอริทึมได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ มากมาย เช่น ปัญหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด การทำนายคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้า รวมไปถึงการหาตัวแปรที่เหมาะสมของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการค้นหาคำตอบโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เหนี่ยวนำที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการค้นหาคำตอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและให้ค่า global optimum เมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาด้วยวิธีอื่น ๆ (Zhang and Tolbert, 2005)



รูปที่ 4.2 วัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึม

4.4 ผลทดสอบ

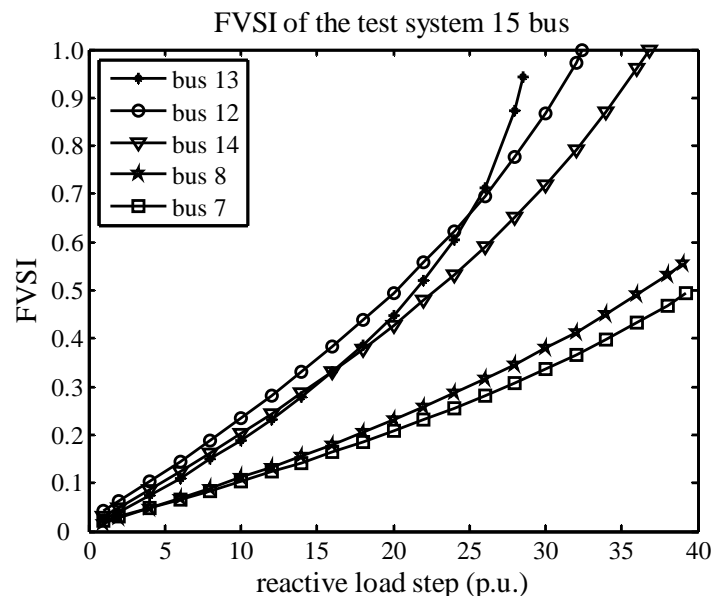
ผลการทดสอบในบทนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดโดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ส่วนที่ 2 เป็นการค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม และส่วนที่ 3 เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุด ระหว่างตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดกับตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยทั้ง 3 ส่วนทดสอบกับระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส 85 บัส และระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ส่วนที่ 1 การค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดโดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI

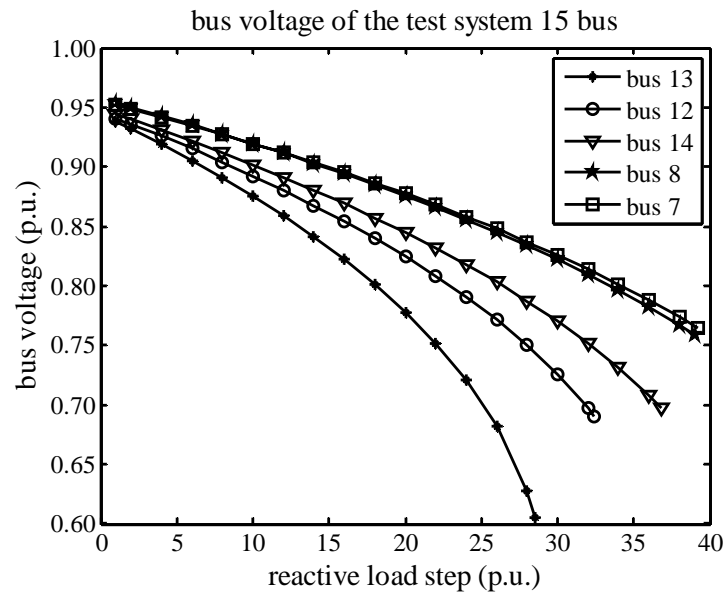
1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟรีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟรีแอกทีฟที่มากที่สุดกำหนดให้เป็นค่า Q_{limit} บัสใดที่มีค่า Q_{limit} น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าบัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัสที่ 13 มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุด เท่ากับ 28.5600 p.u. และค่าดัชนี FVSI เท่ากับ 0.9990 เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบ 15 บัส ในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย บัสที่ 13 จะมีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.6050 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสโหลดของระบบทดสอบ 15 บัส ในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสโหลดมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ บัส 13 จะมีขนาดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัส 13 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด



รูปที่ 4.3 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัส



รูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัส

ตารางที่ 4.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัส

ลำดับ	บัส	Qlimit	FVSI	แรงดันบัส
1	13	28.5600	0.9990	0.6050
2	12	32.4400	0.9994	0.6903
3	14	36.7900	0.9999	0.6975
4	8	39.0300	0.9999	0.7592
5	7	39.2600	0.9999	0.7643
6	6	41.3000	0.9999	0.8097
7	5	45.3400	0.9999	0.6378
8	11	46.3400	0.9997	0.7113
9	10	47.8400	0.9998	0.7048
10	15	49.4300	0.9997	0.5943

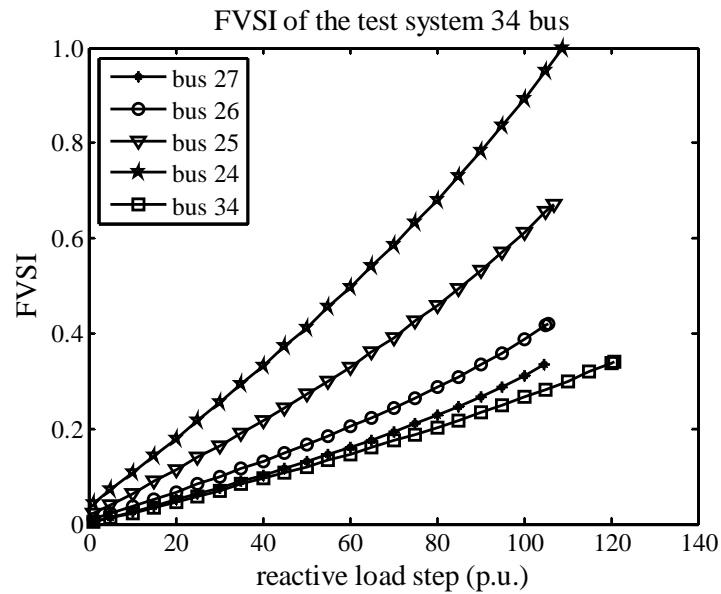
2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้มาจากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสนั้น ค่าดัชนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า

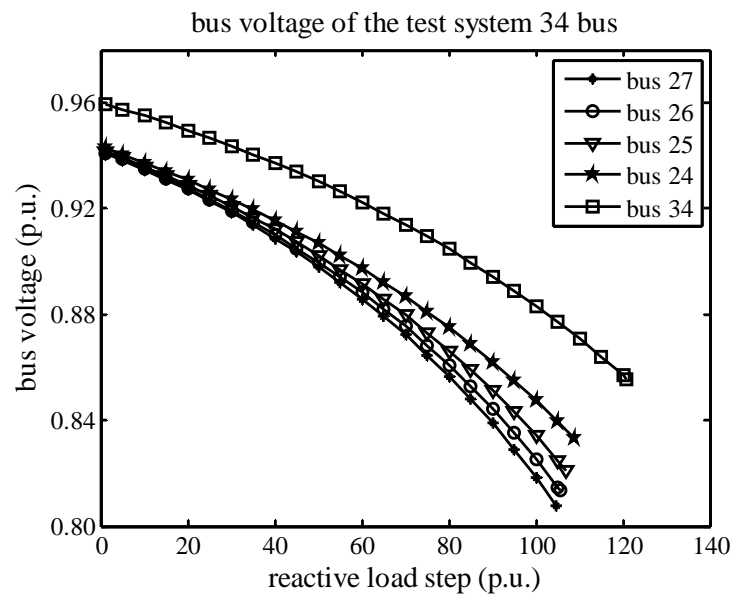
รีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพ แรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.2 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัสที่ 27 ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 26 มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 104.5700 p.u. และดัชนี FVSI มีค่าเท่ากับ 0.9999 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบ ทดสอบ 34 บัส ในรูปที่ 4.5 สายป้อนเส้นที่ 26 25 24 23 และ 33 อ้างอิงถึงบัสที่ 27 26 25 24 และ 34 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย บัสที่ 27 จะมีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสไหลคมีค่า ลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.8077 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัส ไหลคของระบบทดสอบ 34 บัส ในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดัน ที่บัสไหลคมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ บัสที่ 27 จะมีขนาดของ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัส 27 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด

ตารางที่ 4.2 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัส

ลำดับ	บัส	Qlimit	FVSI	แรงดันบัส
1	27	104.5700	0.9999	0.8077
2	26	105.5400	0.9999	0.8136
3	25	106.7900	0.9999	0.8211
4	24	108.8600	0.9999	0.8333
5	34	120.8400	0.9999	0.8557
6	33	121.6800	0.9999	0.8615
7	32	122.9300	0.9999	0.8701
8	12	123.9600	0.9999	0.8768
9	31	124.6000	0.9999	0.8809
10	11	124.7900	0.9999	0.8820



รูปที่ 4.5 คณิตศาสตร์ภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัส



รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัส

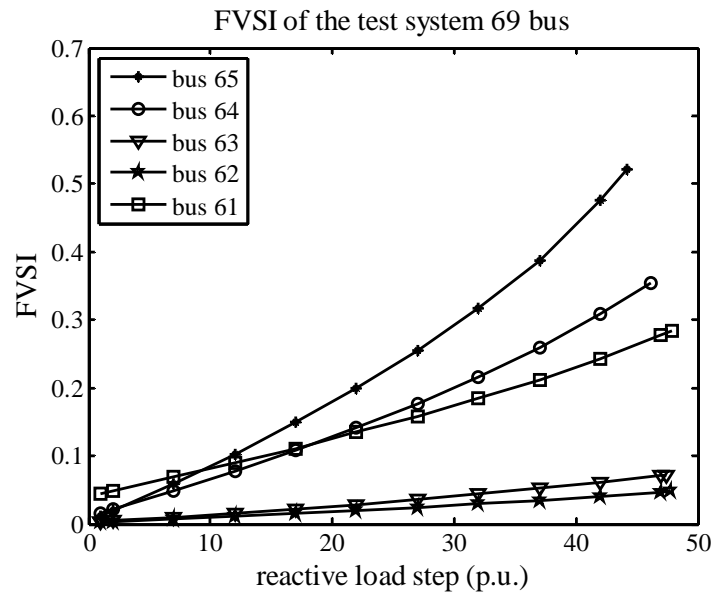
3) ระบบทดสอบ 69 บัส

คณิตศาสตร์ภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก คณิตศาสตร์ภาพแรงดันค่านวนได้มาจากความเสถียรของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสนั้น ค่าคณินหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า

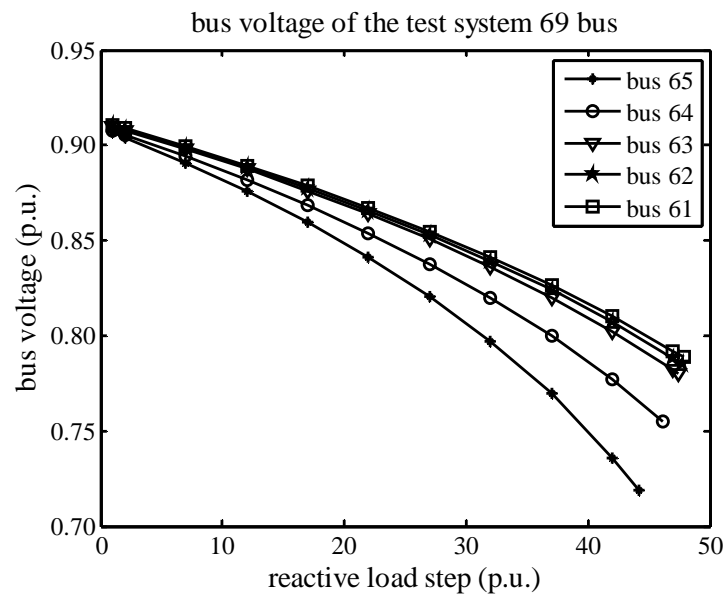
รีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.3 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัสที่ 65 ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 64 มีค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 44.1500 p.u. ค่าดัชนี FVSI เท่ากับ 0.9998 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบ 69 บัส แสดงในรูปที่ 4.7 สายป้อนเส้นที่ 64 63 62 61 และ 60 อ้างอิงถึงบัส 65 64 63 62 และ 61 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI ก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย บัสที่ 65 จะมีค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสไหลคมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.7185 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสไหลคของระบบทดสอบ 69 บัส ในรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสไหลคมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ บัสที่ 65 จะมีขนาดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัสที่ 65 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด

ตารางที่ 4.3 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัส

ลำดับ	บัส	Qlimit	FVSI	แรงดันบัส
1	65	44.1500	0.9998	0.7185
2	64	46.1000	0.9998	0.7549
3	63	47.4600	0.9998	0.7802
4	62	47.7400	0.9999	0.7852
5	61	47.9200	0.9999	0.7885
6	60	49.1700	0.9999	0.8140
7	59	49.8300	0.9999	0.8288
8	58	50.3700	0.9999	0.8407
9	57	51.7200	0.9999	0.8699
10	27	56.0200	0.9992	0.6250



รูปที่ 4.7 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัส



รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัส

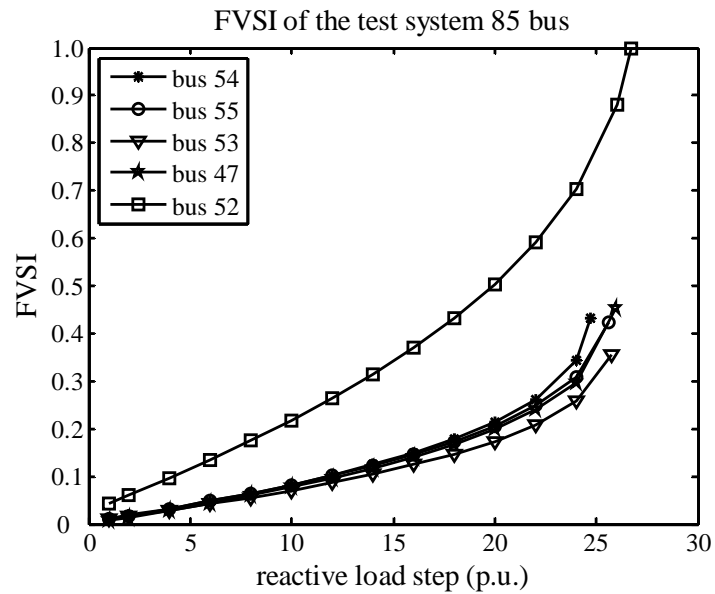
4) ระบบทดสอบ 85 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI สำหรับระบบทดสอบ 85 บัส แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก คำนวณค่าดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้จากความเสถียรของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสนั้น ค่าดัชนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า

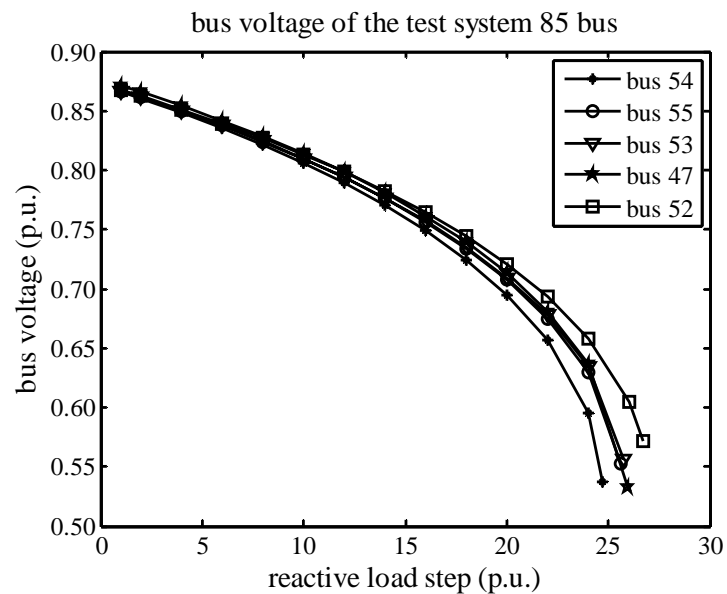
รีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.4 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัสที่ 54 ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 53 มีค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 24.7000 p.u. ค่าดัชนี FVSI เท่ากับ 0.9973 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบ 85 บัส ในรูปที่ 4.9 สายป้อนเส้นที่ 53 54 52 46 51 และ 45 อ้างอิงถึงบัสที่ 54 53 47 52 และ 46 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย บัสที่ 54 จะมีค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสไหลคมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.5368 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสไหลคของระบบทดสอบ 85 บัส ในรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสไหลคมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ บัสที่ 54 จะมีขนาดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัสที่ 54 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด

ตารางที่ 4.4 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัส

ลำดับ	บัส	Qlimit	FVSI	แรงดันบัส
1	54	24.7000	0.9973	0.5368
2	55	25.6200	0.9982	0.5532
3	53	25.7700	0.9972	0.5561
4	47	25.9300	0.7322	0.5330
5	52	26.6900	0.9979	0.5718
6	46	27.1700	0.7857	0.5314
7	51	28.1600	0.6884	0.5337
8	56	28.9800	0.7139	0.5345
9	50	29.4300	0.7277	0.5347
10	45	29.5900	0.8825	0.5331



รูปที่ 4.9 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัส



รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัส

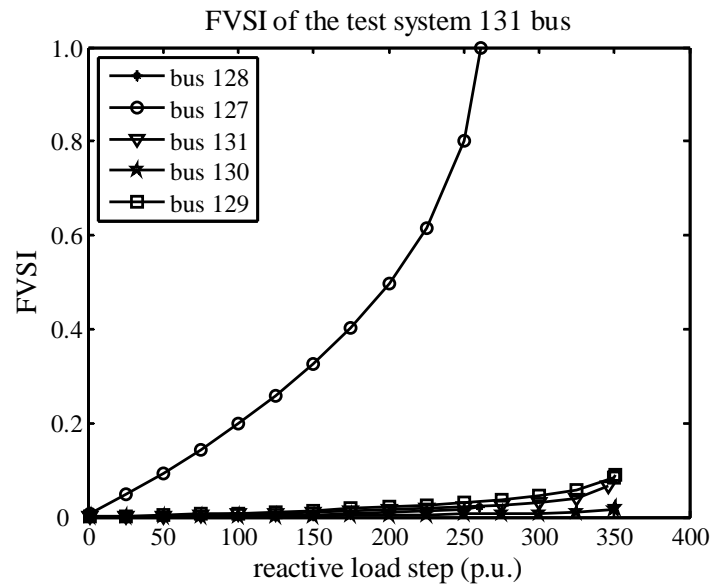
5) ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI สำหรับระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้จากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิง

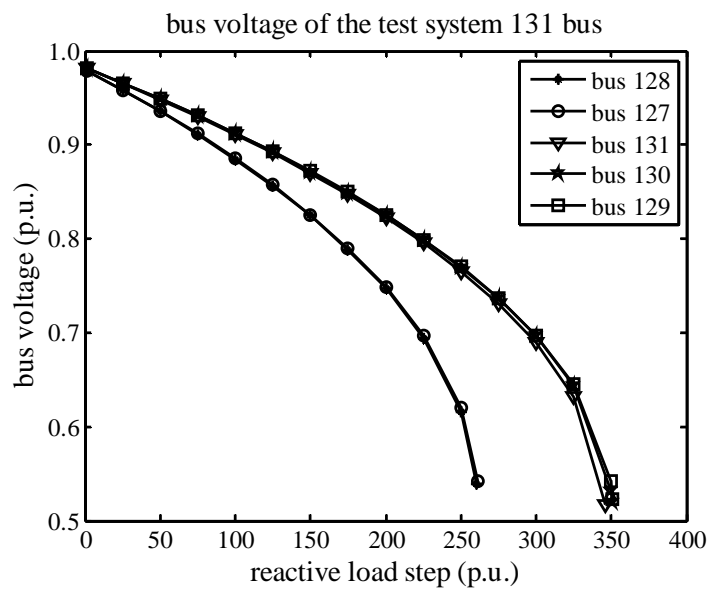
ไปยังบัสนั้น คำนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่านีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดัน ไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด ส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.5 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัสที่ 128 ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 127 มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 271.2300 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟค่อนข้างสูง เนื่องจากระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส เป็นระบบที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 22 kV และโหลดมีขนาดไม่สูงมากนัก สามารถดูข้อมูลระบบทดสอบได้ที่ภาคผนวก ก. ค่าดัชนี FVSI เท่ากับ 0.9998 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ในรูปที่ 4.11 สายป้อนเส้นที่ 127 126 130 129 128 41 และ 125 อ้างอิงถึงบัส 128 127 131 130 129 42 และ 126 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น คำนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย บัสที่ 128 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่คำนี FVSI มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.5498 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสโหลดของระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันที่บัสโหลดมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ บัส 128 จะมีขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัส 128 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด

ตารางที่ 4.5 คำนีเสถียรภาพแรงดัน ไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัส

ลำดับ	บัส	Qlimit	FVSI	แรงดันบัส
1	128	260.1300	0.9997	0.5385
2	127	261.1500	0.9995	0.5407
3	131	345.7200	0.7268	0.5154
4	130	350.4500	0.7356	0.5164
5	129	351.1000	0.7370	0.5165
6	42	353.9300	0.7253	0.5221
7	126	357.1400	0.7498	0.5168
8	125	359.1000	0.7553	0.5161
9	81	360.6700	0.7642	0.5140
10	80	364.0000	0.7720	0.5138



รูปที่ 4.11 คณิตศาสตร์ภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัส

ส่วนที่ 2 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม
 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำได้โดยการหาขนาดและตำแหน่ง
 ติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลการทดลองเป็นดังนี้

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG และตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 15 บัส แสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด 5 อันดับแรก ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด หาได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบทดสอบ 15 บัส ในตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ บัสที่ 4 ซึ่งมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 33.1516 kW เมื่อติดตั้ง SEIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.2564 p.u. และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ 4.5945 p.u. ในระบบไฟฟ้า และมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 29.4694 kW เมื่อติดตั้ง DFIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.5107 p.u. และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ 4.3662 p.u. ในระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 4.6 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 15 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ SEIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ
1	4	33.1516	2.2564	4.5945
2	15	33.4018	2.2734	4.6365
3	11	33.4211	2.2696	4.6097
4	12	35.3668	2.3072	4.6961
5	5	35.4153	2.2875	4.6616

ตารางที่ 4.7 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 15 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ DFIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ
1	4	29.4694	3.5107	4.3662
2	15	30.3123	3.5960	4.3255
3	11	30.3811	3.5794	4.3322

4	3	31.9378	3.4815	4.3997
5	5	32.6081	3.6459	4.3071

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG และตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 34 บัส แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด 5 อันดับแรก ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด หาได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดของระบบทดสอบ 34 บัส ในตารางที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด คือ บัสที่ 26 ซึ่งมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 174.8010 kW เมื่อติดตั้ง SEIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.1599 p.u. และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.4167 p.u. ในระบบไฟฟ้า และมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 163.2144 kW เมื่อติดตั้ง DFIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.7622 p.u. และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.6819 p.u. ในระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 4.8 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 34 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ SEIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
1	26	174.8010	2.1599	4.4167
2	27	174.9034	2.1605	4.4181
3	25	174.9201	2.1605	4.4241
4	24	175.6070	2.1636	4.4268
5	23	177.2664	2.1713	4.4445

ตารางที่ 4.9 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 34 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ DFIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
1	26	163.2144	3.7622	3.6819
2	27	163.3102	3.7669	3.6775
3	25	163.4373	3.7581	3.6888

4	24	164.3329	3.7563	3.6993
5	23	166.5223	3.7533	3.7221

3) ระบบทดสอบ 69 บัส

ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG และตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 69 บัส แสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด 5 อันดับแรก ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด หาได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาบัสที่มีกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 69 บัส ในตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด คือ บัสที่ 64 ซึ่งมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 154.6622 kW เมื่อติดตั้ง SEIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.0603 p.u. และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.2017 p.u. ในระบบไฟฟ้า และมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 138.7996 kW เมื่อติดตั้ง DFIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.5781 p.u. และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.6707 p.u. ในระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 4.10 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 69 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ SEIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
1	64	154.6622	2.0603	4.2017
2	63	155.0904	2.0597	4.2033
3	62	155.1728	2.0595	4.2043
4	61	155.2683	2.0595	4.2028
5	65	155.8102	2.0709	4.2196

ตารางที่ 4.11 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 69 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ DFIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
1	64	138.7996	3.5781	3.6707
2	63	139.4341	3.5643	3.6811
3	62	139.5707	3.5613	3.6829

4	61	139.6831	3.5597	3.6849
5	65	140.0672	3.6124	3.6648

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG และตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 85 บัส แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด 5 อันดับแรก ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด หาได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดของระบบทดสอบ 85 บัส ในตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด คือ บัสที่ 48 ซึ่งมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 217.9083 kW เมื่อติดตั้ง SEIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 1.9682 p.u. และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.9951 p.u. ในระบบไฟฟ้า และมีกำลังงานสูญเสียของระบบ 201.2978 kW เมื่อติดตั้ง DFIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.2341 p.u. และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.8914 p.u. ในระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 4.12 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 85 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ SEIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
1	48	217.8283	1.9682	3.9951
2	52	217.8610	1.9769	4.0100
3	49	217.9038	1.9699	4.0000
4	50	218.1746	1.9733	4.0057
5	53	218.2033	1.9812	4.0186

ตารางที่ 4.13 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 85 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ DFIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
1	48	201.2978	3.2341	3.8914
2	52	201.4567	3.2731	3.8972
3	49	201.4838	3.2391	3.8931

4	50	201.7792	3.2510	3.8958
5	53	201.9119	3.2846	3.9009

5) ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG และตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 131 บัส แสดงในตารางที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด 5 อันดับแรก ตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด หาได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาบัสที่มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบทดสอบ 131 บัส ในตารางที่ 4.14 และ 4.15 จะเห็นว่าบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ บัสที่ 127 ซึ่งมีค่ากำลังงานสูญเสียของระบบ 35.9447 kW เมื่อติดตั้ง SEIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.3231 p.u. และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ 4.7546 p.u. ในระบบไฟฟ้า และมีค่ากำลังงานสูญเสียของระบบ 33.5228 kW เมื่อติดตั้ง DFIG ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.9771 p.u. และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ 3.8168 p.u. ในระบบ

ตารางที่ 4.14 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง SEIG ของระบบทดสอบ 131 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ SEIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ
1	127	35.9447	2.3231	4.7546
2	128	35.9542	2.3232	4.7555
3	78	36.4148	2.3230	4.7546
4	77	36.4151	2.3230	4.7564
5	75	36.4182	2.3228	4.7551

ตารางที่ 4.15 บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง DFIG ของระบบทดสอบ 131 บัส

ลำดับ	บัส	กำลังงานสูญเสีย (kW)	ขนาดของ DFIG (p.u.)	
			กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ
1	127	33.5228	3.9771	3.8168
2	128	33.5292	3.9822	3.8105
3	78	34.1891	3.9456	3.8839

4	77	34.2030	3.9445	3.8741
5	75	34.2313	3.9454	3.8819

ส่วนที่ 3 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดระหว่างตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดกับตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำได้โดยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดหรือตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด (รายละเอียดการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสม นำเสนอในบทที่ 6) จากนั้นทำการหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนี FVSI มีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใด ระหว่างบัสที่อ่อนแอที่สุดกับบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดแล้วทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดได้มากที่สุด แสดงว่าบัสนั้นเป็นบัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลการทดลองเป็นดังนี้

1) ระบบทดสอบ 15 บัส

สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด คือบัสที่ 13 ส่วนตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือบัสที่ 4 ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้ สำหรับ SEIG ทดสอบโดยติดตั้ง SEIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 13 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.3485 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 4.7678 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 39.2816 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง SEIG ไปที่บัสที่ 4 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.2564 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 4.5945 p.u. ทำให้ระบบมีค่ากำลังงานสูญเสีย 33.1516 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.16 สำหรับ DFIG ทดสอบโดยติดตั้ง DFIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 13 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.9841 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 4.0232 p.u. ทำให้ระบบมีค่ากำลังงานสูญเสีย 37.1420 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง DFIG ไปที่บัสที่ 4 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.5107 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 4.3662 p.u. ทำให้ระบบมีค่ากำลังงานสูญเสีย 29.4694 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.17 พิจารณาผลการทดสอบในตาราง 4.16 พบว่าการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 28.5600 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 34.1900 p.u. คิดเป็น 19.1729% ส่วนการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดบัสจาก 28.5600 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 29.7100 p.u. คิดเป็น 4.0266% และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบในตารางที่ 4.17 พบว่าการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดบัส

จาก 28.5600 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 33.9800 p.u. คิดเป็น 18.9776% ส่วนการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 28.5600 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 29.8600 p.u. คิดเป็น 4.5518% ซึ่งการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ดังนั้นบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.16 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG

ลำดับ	ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 13)		ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด (บัส 4)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	13	34.1900	13	29.7100
2	12	37.8700	12	33.7300
3	14	38.2800	14	38.8500
4	8	39.8300	8	39.8100
5	7	40.0600	7	40.0500

ตารางที่ 4.17 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 15 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG

ลำดับ	ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 13)		ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด (บัส 4)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	13	33.9800	13	29.8600
2	12	37.6100	12	33.9000
3	14	38.4200	14	39.0900
4	8	39.9100	8	39.9200
5	7	40.1500	7	40.1600

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด คือบัสที่ 27 ส่วนตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด คือบัสที่ 26 ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้ สำหรับ SEIG ทดสอบโดยติดตั้ง SEIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 27 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสม

ที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.1605 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 4.4181 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 174.9034 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง SEIG ไปที่บัสที่ 26 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 2.1599 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 4.4167 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 174.8010 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.18 สำหรับ DFIG ทดสอบโดยติดตั้ง DFIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 27 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.7669 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 3.6775 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 163.3102 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง DFIG ไปที่บัสที่ 26 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.7622 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 3.6819 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 163.2144 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.19 พิจารณาผลการทดสอบในตาราง 4.18 พบว่าการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 104.5700 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 110.0300 p.u. คิดเป็น 5.2214% ส่วนการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำให้สามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 104.5700 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 109.9500 p.u. คิดเป็น 5.1449% และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบในตาราง 4.19 พบว่าการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 104.5700 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 110.0600 p.u. คิดเป็น 5.2501% ส่วนการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 104.5700 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 110.0000 p.u. คิดเป็น 5.1927% การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดดังนั้นบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.18 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG

ลำดับ	ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 27)		ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด (บัส 26)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	27	110.0300	27	109.9500
2	26	111.0000	26	111.0000
3	25	112.2600	25	112.2600
4	24	114.3300	24	114.3200
5	34	121.5300	34	121.5300

ตารางที่ 4.19 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 34 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG

ลำดับ	ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 27)		ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด (บัส 26)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	27	110.0600	27	110.0000
2	26	111.0300	26	111.0300
3	25	112.2900	25	112.2900
4	24	114.3600	24	114.3600
5	34	121.7500	34	121.7500

3) ระบบทดสอบ 69 บัส

สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด คือบัสที่ 65 ส่วนตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือบัสที่ 64 ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้ สำหรับ SEIG ทดสอบโดยติดตั้ง SEIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 65 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.0709 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.2196 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 155.8102 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง SEIG ที่บัส 64 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.0603 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.2017 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 154.6622 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.20 สำหรับ DFIG ทดสอบโดยติดตั้ง DFIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 65 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.6124 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.6648 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 140.0672 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง DFIG ไปที่บัสที่ 64 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.5781 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.6707 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 138.7996 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.21 พิจารณาผลการทดสอบในตารางที่ 4.20 พบว่า การติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 44.1500 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 48.9600 p.u. คิดเป็น 10.8946% ส่วนการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 44.1500 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 48.5600 p.u. คิดเป็น 9.9887% และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบในตาราง 4.21

พบว่า การติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 44.1500 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 48.8100 p.u. คิดเป็น 10.5549% ส่วนการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มี กำลังงานสูญเสีย้อยที่สุด ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 44.1500 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 48.4900 p.u. คิดเป็น 9.8301% การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่อ่อนแอ ที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่มีกำลัง งานสูญเสีย้อยที่สุด ดังนั้นบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.20 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG

ลำดับ	ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 65)		ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสีย้อยที่สุด (บัส 64)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	65	48.9600	65	48.5600
2	64	50.8300	64	50.8300
3	63	52.1700	63	52.1600
4	62	52.4300	62	52.4300
5	61	52.6100	61	52.6100

ตารางที่ 4.21 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 69 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG

ลำดับ	ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 65)		ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสีย้อยที่สุด (บัส 64)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	65	48.8100	65	48.4900
2	64	50.6500	64	50.6600
3	63	51.9600	63	51.9800
4	62	52.2300	62	52.2400
5	61	52.4100	61	52.4200

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

สำหรับระบบทดสอบ 85 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด คือบัสที่ 54 ส่วนตำแหน่งบัส

ที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือบัสที่ 48 ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้ สำหรับ SEIG ทดสอบโดยติดตั้ง SEIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 54 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 1.9875 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.0290 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 218.8560 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง SEIG ที่บัส 48 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 1.9682 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.9951 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 217.8283 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.22 สำหรับ DFIG ทดสอบโดยติดตั้ง DFIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 54 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.3057 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.9052 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 202.7238 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง DFIG ไปที่บัสที่ 48 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.2341 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.8914 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 201.2978 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.23 พิจารณาผลการทดสอบในตารางที่ 4.22 พบว่า การติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัสจากเดิม 24.7000 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 29.9800 p.u. คิดเป็น 21.3765% ส่วนการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 24.7000 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 28.2300 p.u. คิดเป็น 14.2915% และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบในตาราง 4.23 พบว่า การติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 24.7000 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 29.6100 p.u. คิดเป็น 19.8785% ส่วนการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 24.7000 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 28.8800 p.u. คิดเป็น 16.9231% การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ดังนั้นบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.22 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG

ลำดับ	ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 54)		ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด (บัส 48)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	47	29.0100	54	28.2300
2	54	29.9800	47	29.0000
3	46	30.4900	55	29.2500

4	55	30.5200	53	29.4200
5	53	31.0100	52	30.4400

ตารางที่ 4.23 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 85 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG

ลำดับ	ติดตั้ง DFIG		ติดตั้ง DFIG	
	ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 54)		ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด (บัส 48)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	47	29.6100	54	28.8800
2	54	30.6300	47	29.6000
3	46	31.1200	55	29.9000
4	55	31.1800	53	30.0700
5	53	31.6500	52	31.1000

5) ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

สำหรับระบบทดสอบ 131 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด คือบัส 128 ส่วนตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือบัสที่ 127 ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้ สำหรับ SEIG ทดสอบโดยติดตั้ง SEIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 128 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 2.3232 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.7555 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 35.9542 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอ จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง SEIG ไปที่บัสที่ 127 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 2.3231 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.7546 p.u. ทำให้ระบบมีค่ากำลังงานสูญเสีย 35.9447 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.24 สำหรับ DFIG ทดสอบโดยติดตั้ง DFIG ที่ตำแหน่งบัสที่ 128 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.9822 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.8105 p.u. ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสีย 33.5292 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งของ DFIG ไปที่บัสที่ 127 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.9771 p.u. ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.8168 p.u. ทำให้ระบบมีค่ากำลังงานสูญเสีย 33.5228 kW และค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.25 พิจารณาผลของการทดสอบในตารางที่ 4.24 พบว่า การติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอสุด ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 260.1300 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 265.6300 p.u. คิดเป็น 2.1143% ส่วนการติดตั้ง SEIG บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลด

บัส จากเดิม 260.1300 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 265.5900 p.u. คิดเป็น 2.0989% และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่แสดงในตาราง 4.25 พบว่า การติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 260.1300 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 265.2100 p.u. คิดเป็น 1.9529% ส่วนการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีค่าของกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัส จากเดิม 260.1300 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 265.1900 p.u. คิดเป็น 1.9452% การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ดังนั้นบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.24 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัสหลังจากติดตั้ง SEIG

ลำดับ	ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 128)		ติดตั้ง SEIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด (บัส 127)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	128	265.6300	128	265.5900
2	127	266.6500	127	266.6400
3	131	350.8600	131	350.8600
4	130	355.7200	130	355.7200
5	129	356.3900	129	356.3900

ตารางที่ 4.25 บัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 131 บัสหลังจากติดตั้ง DFIG

ลำดับ	ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด (บัส 128)		ติดตั้ง DFIG ที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด (บัส 127)	
	บัส	Qlimit	บัส	Qlimit
1	128	265.2100	128	265.1900
2	127	266.2300	127	266.2300
3	131	350.5000	131	350.5000
4	130	355.3400	130	355.3500
5	129	356.0000	129	356.0100

4.5 สรุป

การกำหนดตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสมจะช่วยให้โหลดส่วนใหญ่ของระบบได้รับการป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบในภาพรวม สำหรับการเลือกตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้พิจารณาเป็นสองกรณี คือกรณีแรก พิจารณาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสโหลดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพมากที่สุด ในรูปของการประเมินบัสอ่อนแอ ด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสโหลด บัสที่มีค่าการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้น้อยที่สุดเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด กรณีที่สองพิจารณตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสที่มีกำลังงานสูญเสีย้อยที่สุด โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้จิ้นเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งทั้งตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสีย้อยที่สุด เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับการเลือกตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างบัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสที่มีกำลังงานสูญเสีย้อยที่สุด ทำได้โดยการทดลองติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสไหนแล้วทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดได้มากที่สุด แสดงว่าบัสนั้นเป็นบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับการวางแผนระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อให้การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดผลดีต่อระบบมากที่สุด จะนำเสนอในลำดับต่อไป

บทที่ 5

ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

5.1 บทนำ

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นการดำเนินการวางแผนชุดเซชระบบโดยยึดหลักของประสิทธิภาพโดยรวมและประหยัด ดังนั้น การกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมและขนาดที่พอเหมาะ จะช่วยให้โหลดส่วนใหญ่ของระบบได้รับการป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบในภาพรวม ปัญหาการกำหนดขนาดที่เหมาะสมเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดรูปแบบหนึ่ง การแก้ปัญหาที่มีกระบวนการที่แน่นอนและอัลกอริทึมที่ชัดเจน เช่น การโปรแกรมลำดับควอดราติก (SQP) และเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม ในส่วนของการหาตำแหน่งติดตั้งเป็นประเด็นที่ละเอียดอ่อนและต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง พิจารณาได้ดังนี้

5.2 การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม

การค้นหาตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม สามารถพิจารณาจากตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดจากการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดัน และตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดจากการคำนวณกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังรายละเอียดในบทที่ผ่านมา ส่วนการหาขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม ดังนี้

5.2.1 การหาตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การพิจารณาค่าเหมาะที่สุดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาเป็นสองกรณี กรณีแรกพิจารณาค่าเหมาะที่สุดที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสโหลดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพมากที่สุด ในรูปของการประเมินบัสอ่อนแอ (weak bus evaluation) ด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม กรณีที่สองพิจารณาค่าเหมาะที่สุดที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากนั้นทำการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ระหว่างบัสที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพมากที่สุดและบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เพื่อเปรียบเทียบข้อดีระหว่างบัสดังกล่าว ผลการทดสอบพบว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่อ่อนแอที่สุด ทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้มากกว่า การติดตั้งเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ดังนั้นบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

5.2.2 การหาขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหาค่าเหมาะที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม ดำเนินการโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้แก่ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง ขนาดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ และค่าสลลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะที่สุดได้ดังสมการที่ (5.1)

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && P_{loss} \\
 &\text{subject to} && P_{g,i}^{min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{max} \quad \text{p.u.} \\
 & && Q_{g,i}^{min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{max} \quad \text{p.u.} \\
 & && slip_{g,i}^{min} \leq slip_{g,i} \leq slip_{g,i}^{max}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

โดยที่	P_{loss}	คือ	ฟังก์ชันกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบ
	$P_{g,i}^{min}$	คือ	ขนาดของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
	$P_{g,i}^{max}$	คือ	ขนาดของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
	$Q_{g,i}^{min}$	คือ	ขนาดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
	$Q_{g,i}^{max}$	คือ	ขนาดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
	$slip_{g,i}^{min}$	คือ	ค่าสลลิปต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
	$slip_{g,i}^{max}$	คือ	ค่าสลลิปสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อกำลังงานสูญเสียในสายป้อนคำนวณได้จากค่าแรงดันบัสที่ได้จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และคำนวณกำลังงานสูญเสียในสายส่ง พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างบัส i และ j ในรูปที่ 5.1 ใช้วิธีวิเคราะห์แบบโนดจะได้กระแสไฟฟ้าจากบัส $i \rightarrow j$ และจาก $j \rightarrow i$ ดังสมการที่ (5.2) และ (5.3) ตามลำดับ

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \tag{5.2}$$

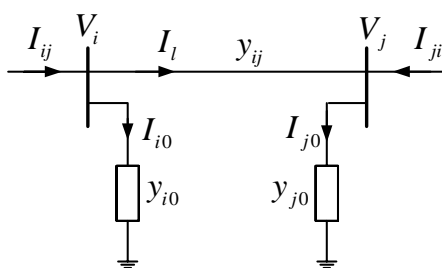
$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \tag{5.3}$$

กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนจากบัส i ไปบัส j หรือ (S_{ij}) เป็นดังสมการ (5.4)

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (5.4)$$

กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนจากบัส j ไปบัส i หรือ (S_{ji}) เป็นดังสมการ (5.5)

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.1 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

กำลังงานสูญเสียในสายป้อนคือส่วนจริงของกำลังงานสูญเสียในสายส่งจากบัส i ไปบัส j ซึ่งหาได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งดังสมการที่ (5.6)

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (5.6)$$

5.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบในบทนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง (SEIG) เมื่อติดตั้ง SEIG ที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และส่วนที่ 2 เป็นการค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน (DFIG) เมื่อติดตั้ง DFIG ที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยทั้ง 2 ส่วนทดสอบกับระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส 85 บัส และระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การค้นหาค่าที่ดีที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด สามารถทำได้โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในวิธานิพนธ์นี้เลือกใช้เงินเนติกอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB ร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้ฟังก์ชันค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ซึ่งตัวแปรที่สำคัญและค่าของตัวแปรที่เลือกใช้แสดงในตารางที่ 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

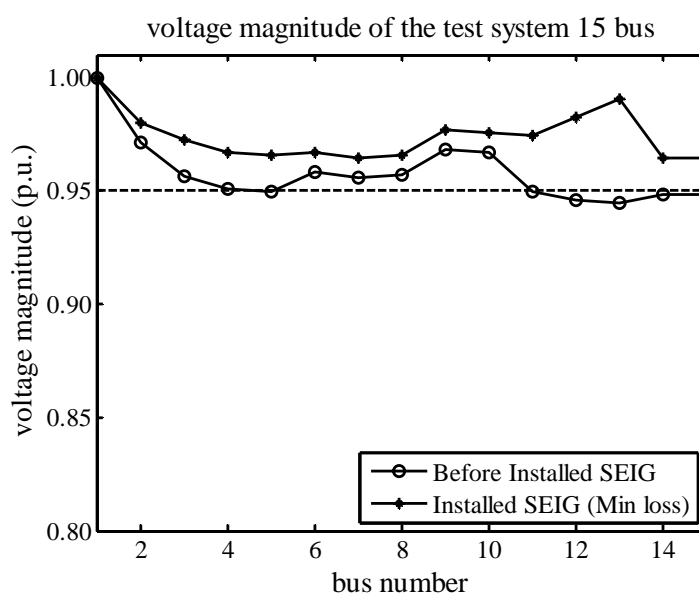
ส่วนที่ 1 การค้นหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมของ SEIG

การค้นหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมของ SEIG ทำได้โดยการติดตั้ง SEIG ที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดในแต่ละระบบทดสอบ จากนั้นหาค่าที่ดีที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งได้แก่ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG (P_{SEIG}) มีขนาดตั้งแต่ 0-3.00 p.u. ค่าสลิปของ SEIG มีค่าไม่เกิน 5.00% ผลการทดลองเป็นดังนี้

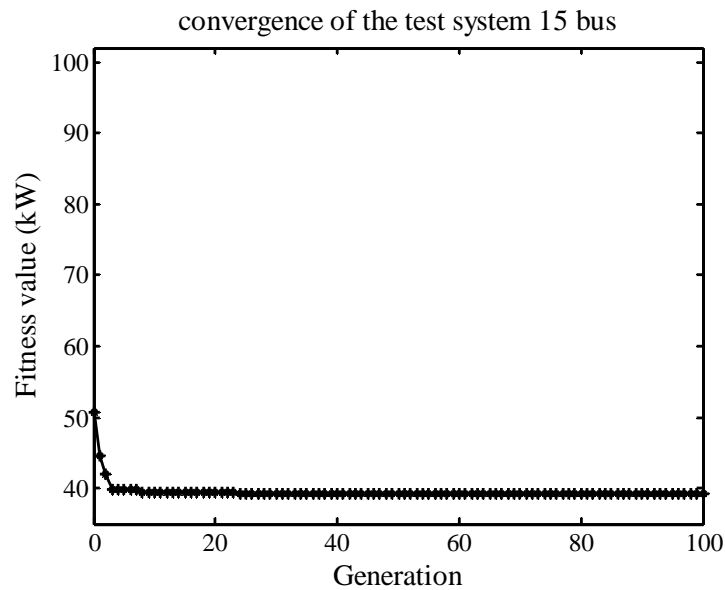
1) ระบบทดสอบ 15 บัส

การค้นหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส หาได้โดยการติดตั้ง SEIG ที่บัส 13 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาค่าที่ดีที่สุดของ SEIG โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้เงินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผล

ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และการสูญเสียของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง SEIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด พิจารณาการสูญเสียหาคำตอบของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.3 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 39.2861 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 2.3485 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.7678 p.u. และค่าสลิป 1.83% ซึ่งเป็นจุดทำงานของ SEIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้ง SEIG จาก 61.7944 kW ลดลงเป็น 39.2861 kW หลังการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 13 คิดเป็น 36.4245% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 15 บัส มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด



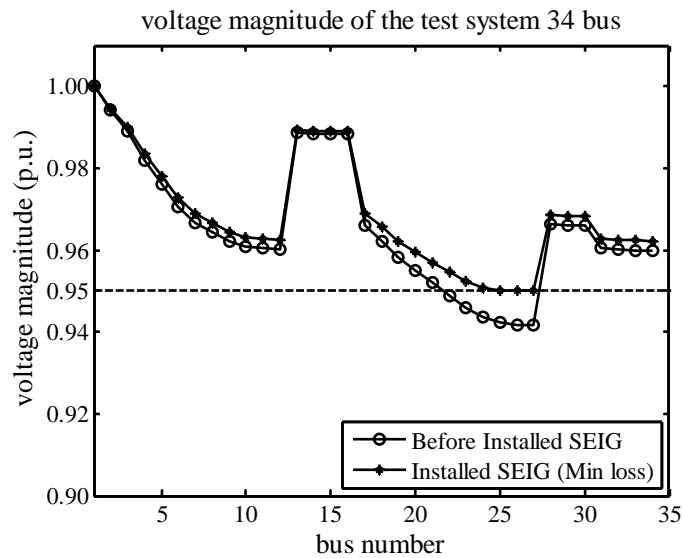
รูปที่ 5.2 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 13 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 15 บัส



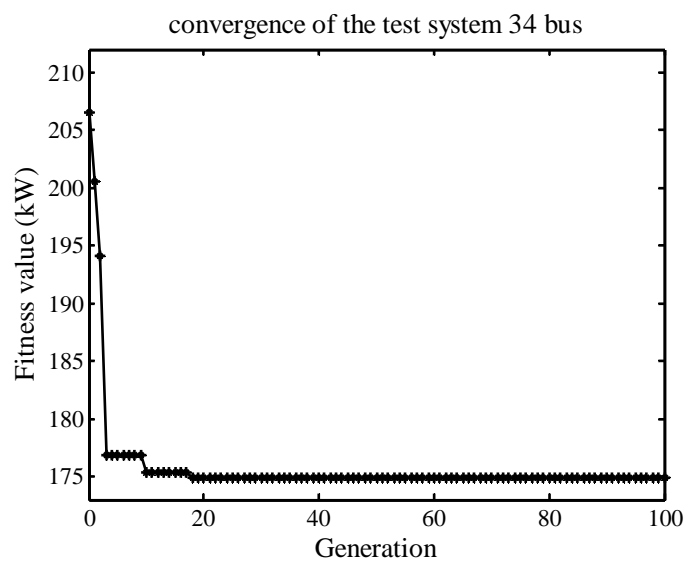
รูปที่ 5.3 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม
ของระบบทดสอบ 15 บัส

2) ระบบทดสอบ 34 บัส

การค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส หาได้โดยการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 27 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และการลู่เข้าของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง SEIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัดพิจารณาการลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม แสดงในรูป 5.5 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 174.9056 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 2.1605 p.u. กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 4.4181 p.u. และค่าสลิป 1.80% ซึ่งเป็นจุดทำงานของ SEIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 221.7235 kW ลดลงเป็น 174.9056 kW หลังการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 27 คิดเป็น 21.1154% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 34 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



รูปที่ 5.4 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 27 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 34 บัส

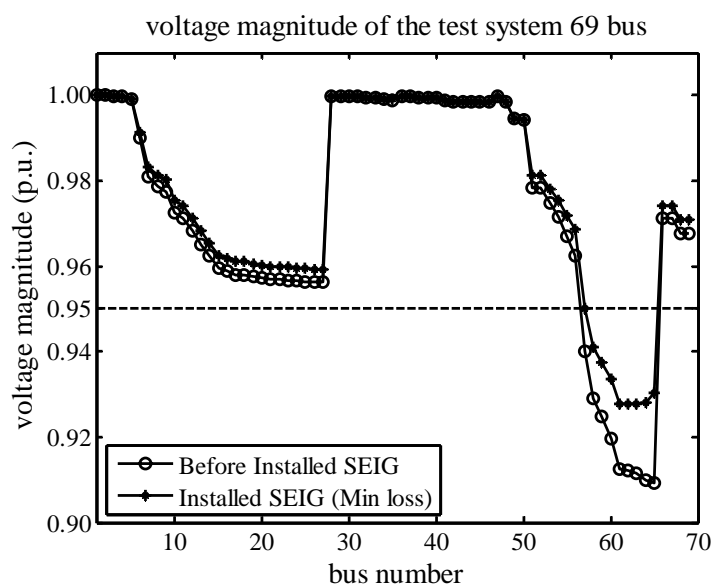


รูปที่ 5.5 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึมของระบบทดสอบ 34 บัส

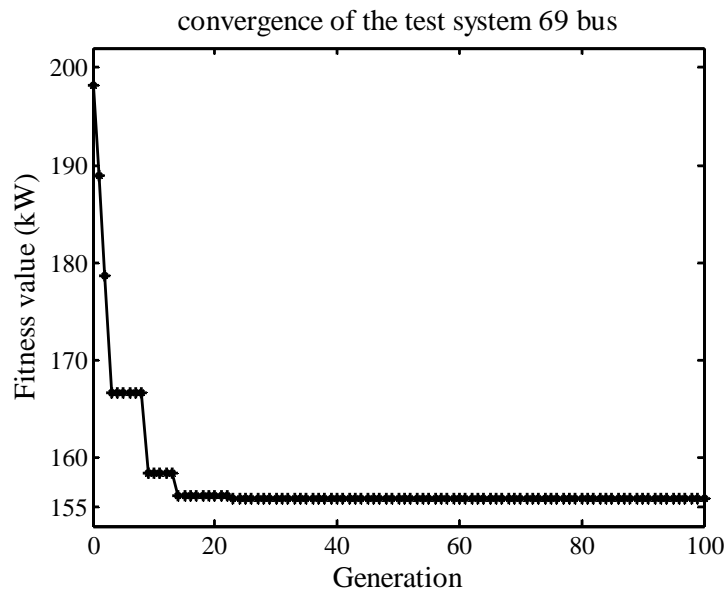
3) ระบบทดสอบ 69 บัส

การค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส หาได้โดยการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 65 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพ

แรงดันมากที่สุด จากนั้นหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และการดูเข้าของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง SEIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด ซึ่งมีเพียงบัสที่ 58-65 เท่านั้นที่ระดับแรงดันมีค่าน้อยกว่า 0.95 p.u. ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันของระบบทดสอบ 69 บัสก่อนการติดตั้งมีค่าต่ำ ทำให้การติดตั้ง SEIG ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพียงอย่างเดียวไม่สามารถยกระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟตัวอื่นเพิ่ม เช่น ตัวเก็บประจุ จะช่วยรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ พิจารณาการดูเข้าหาคำตอบของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.7 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 155.8102 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 2.0709 p.u. กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 4.2196 p.u. และค่าสลิป 1.81% ซึ่งเป็นจุดทำงานของ SEIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 225.0028 kW ลดลงเป็น 155.8102 kW หลังการติดตั้ง SEIG ที่บัส 65 คิดเป็น 30.7519% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 69 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



รูปที่ 5.6 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 65 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 69 บัส

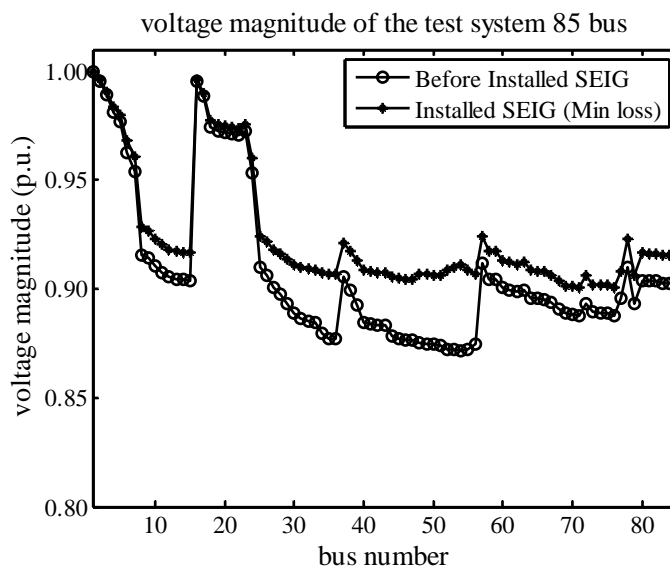


รูปที่ 5.7 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม
ของระบบทดสอบ 69 บัส

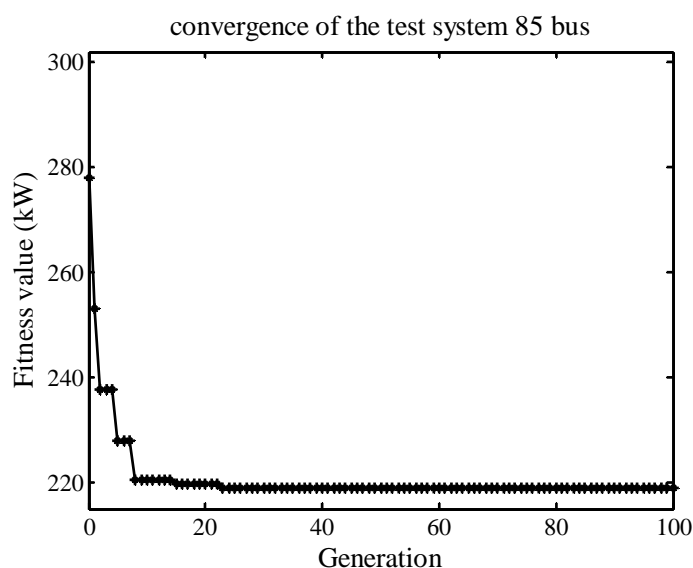
4) ระบบทดสอบ 85 บัส

การค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG สำหรับระบบทดสอบ 85 บัส หาได้โดยการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 54 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และการลู่เข้าของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง SEIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง เนื่องจากแรงดันของระบบทดสอบ 85 บัสก่อนการติดตั้งมีค่าต่ำมาก ทำให้การติดตั้ง SEIG ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถยกระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตัวอื่นเพิ่ม เช่น ตัวเก็บประจุ หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบสถิต จะสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ พิจารณาการลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.9 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 218.8560 kW จุดทำงานของ SEIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 1.9875 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

4.0290 p.u. และค่าสลิป 1.83% ซึ่งเป็นจุดทำงานของ SEIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 315.7013 kW ลดลงเป็น 218.8560 kW หลังการติดตั้ง SEIG ที่บัส 54 คิดเป็น 30.6762% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 85 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



รูปที่ 5.8 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 54 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 85 บัส

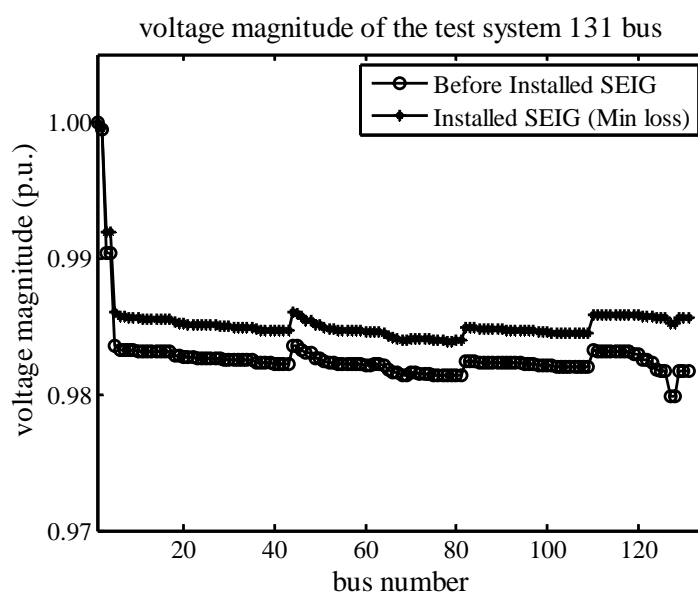


รูปที่ 5.9 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

ของระบบทดสอบ 85 บัส

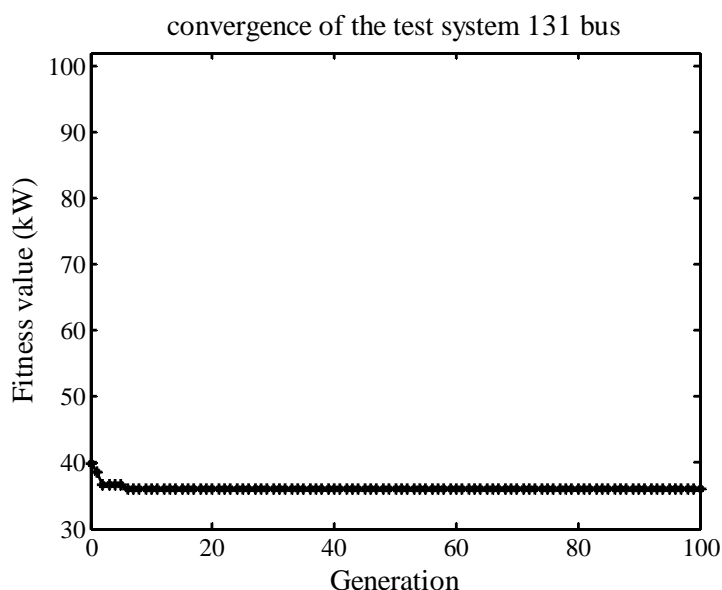
5) ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

การค้นหาค่าติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG สำหรับระบบทดสอบ 131 บัส หาได้ โดยการติดตั้ง SEIG ที่บัสที่ 128 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของ SEIG โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้เงินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิต ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SEIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และการดูเข้าของการค้นหาค่าด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง SEIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัดพิจารณาการดูเข้าหาค่าตอบของการค้นหาค่าด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.11 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 35.9542 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ SEIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 2.3232 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 4.7555 p.u. และค่าสลิป 1.80% ซึ่งเป็นจุดทำงานของ SEIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้ง SEIG จาก 45.6667 kW ลดลงเป็น 35.9542 kW หลังการติดตั้ง SEIG ที่บัส 128 คิดเป็น 21.2682% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 131 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



รูปที่ 5.10 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง SEIG ที่บัส 128 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด

ของระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ 5.11 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ SEIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม
ของระบบทดสอบ 131 บัส

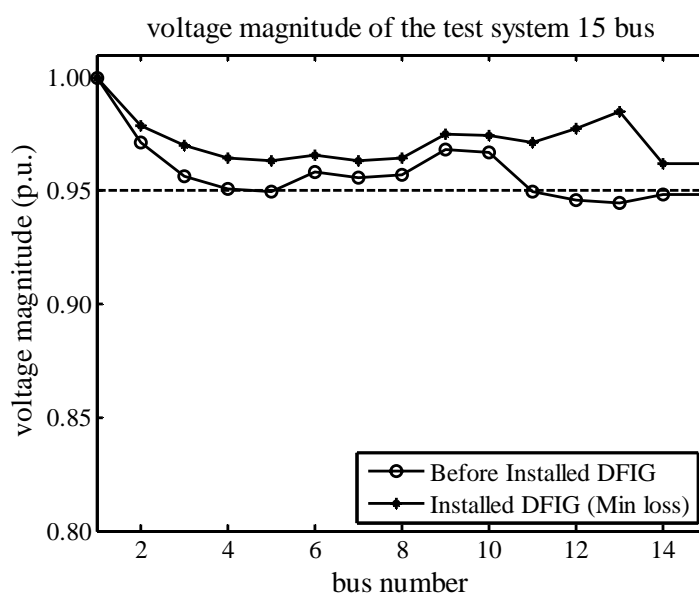
ส่วนที่ 2 การค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของ DFIG

การค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของ DFIG ทำได้โดยการติดตั้ง DFIG ที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดในแต่ละระบบทดสอบ จากนั้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งได้แก่ ขนาดของกำลังไฟฟ้าจริง ค่าสลิปของ DFIG และแรงดันด้านโรเตอร์ มีรายละเอียดดังนี้ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG (P_{DFIG}) มีขนาดตั้งแต่ 0-5.00 p.u. ค่าสลิปของ DFIG มีค่าไม่เกิน 10.00% และขนาดของแรงดันด้านโรเตอร์มีค่าไม่เกิน 0.05 p.u. ผลการทดลองเป็นดังนี้

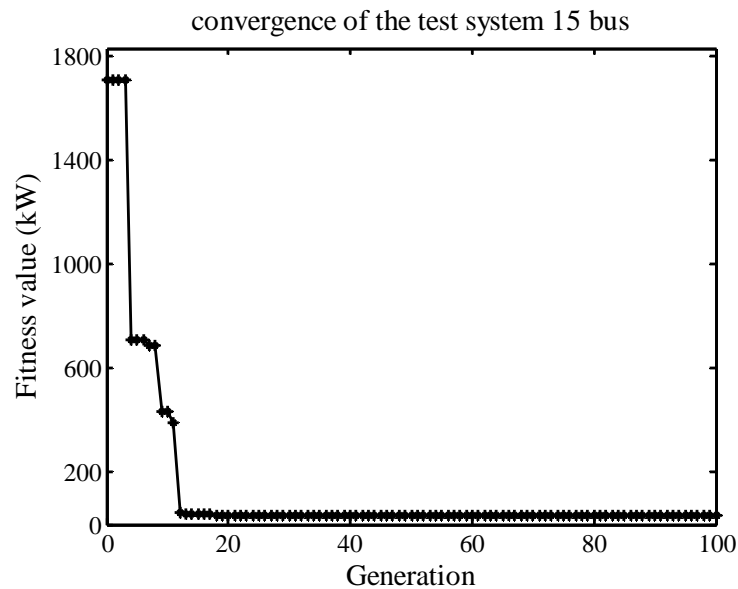
1) ระบบทดสอบ 15 บัส

การค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG สำหรับระบบทดสอบ 15 บัส หาได้โดยการติดตั้ง DFIG ที่บัส 13 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และการลู่เข้า

ของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง DFIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด พิจารณาการลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.13 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 37.1420 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.9841 p.u. กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 4.0232 p.u. ค่าสลลิป 5.07% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0358 p.u. ซึ่งเป็นจุดทำงานของ DFIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 61.7944 kW ลดลงเป็น 37.1420 kW หลังการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 13 คิดเป็น 39.8942% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 15 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



รูปที่ 5.12 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 13 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 15 บัส

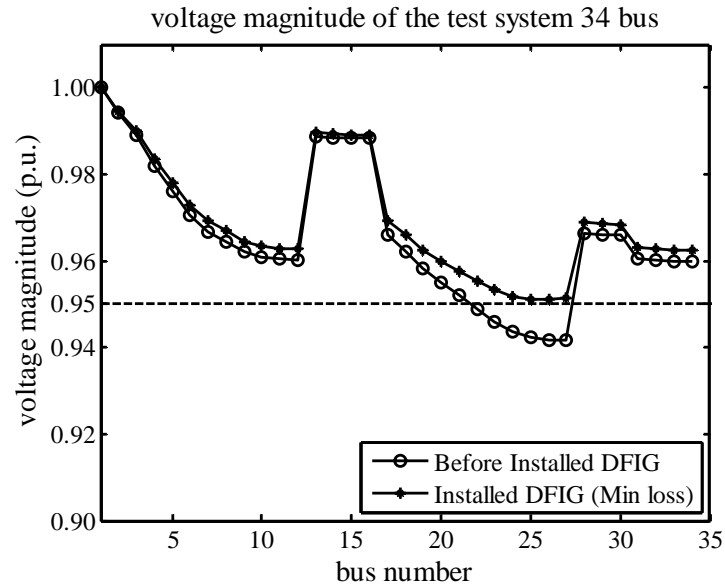


รูปที่ 5.13 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม
ของระบบทดสอบ 15 บัส

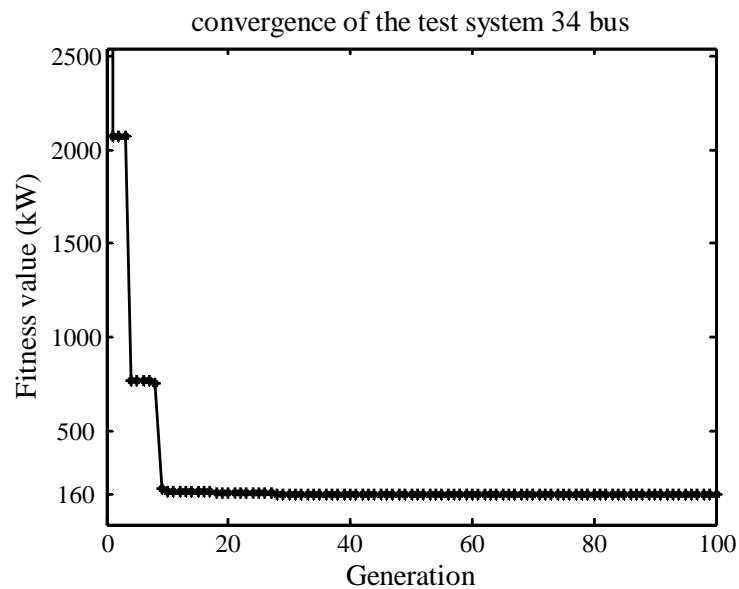
3) ระบบทดสอบ 34 บัส

การค้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส หาได้โดยการติดตั้ง DFIG ที่บัส 27 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 และการลู่เข้าของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.15 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.14 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง DFIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัดพิจารณาการลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.15 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 163.3102 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.7669 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 3.6775 p.u. ค่าสลลิป 4.97% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0359 p.u. ซึ่งเป็นจุดทำงานของ

DFIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 221.7235 kW ลดลงเป็น 163.3102 kW หลังการติดตั้ง คิดเป็น 26.3451% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบ 34 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



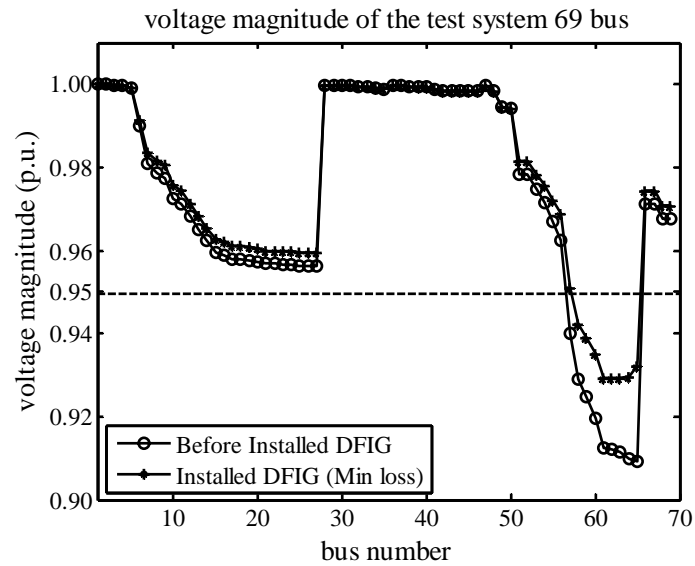
รูปที่ 5.14 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 27 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 34 บัส



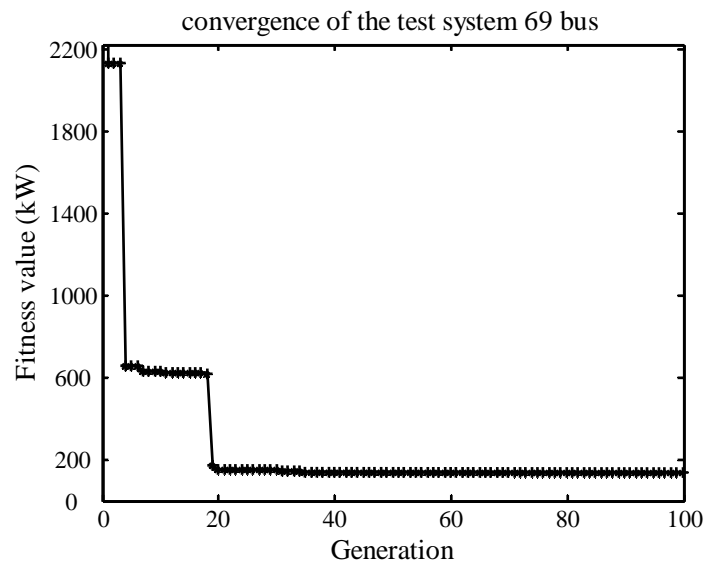
รูปที่ 5.15 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึมของระบบทดสอบ 34 บัส

4) ระบบทดสอบ 69 บัส

การค้นหาค่าติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส หาได้โดยการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 65 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้เงินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิต ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.16 และการดูเข้าของการค้นหาด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.17 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.16 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง DFIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด ซึ่งมีเพียงบัสที่ 58-65 เท่านั้นที่ระดับแรงดันมีค่าน้อยกว่า 0.95 p.u. ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงดันของระบบทดสอบ 69 บัสก่อนการติดตั้ง DFIG มีค่าที่ต่ำมาก ทำให้การติดตั้ง DFIG ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพียงอย่างเดียวไม่สามารถยกระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตัวอื่นเพิ่ม เช่น ตัวเก็บประจุ หม้อแปลงชนิดเปลี่ยนค่าแท็ปได้ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบสถิต จะสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ พิจารณาการดูเข้าหาค่าตอบของการค้นหาด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.17 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 140.0067 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.6124 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 3.6648 p.u. ค่าสลิป 5.16% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0360 p.u. ซึ่งเป็นจุดทำงานของ DFIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 225.0028 kW ลดลงเป็น 140.0067 kW หลังการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 65 คิดเป็น 37.7756% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 69 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



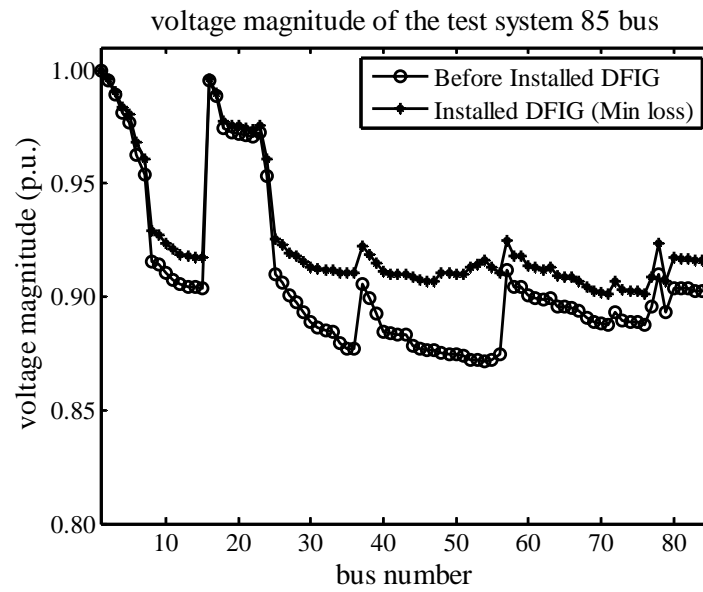
รูปที่ 5.16 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 65 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 69 บัส



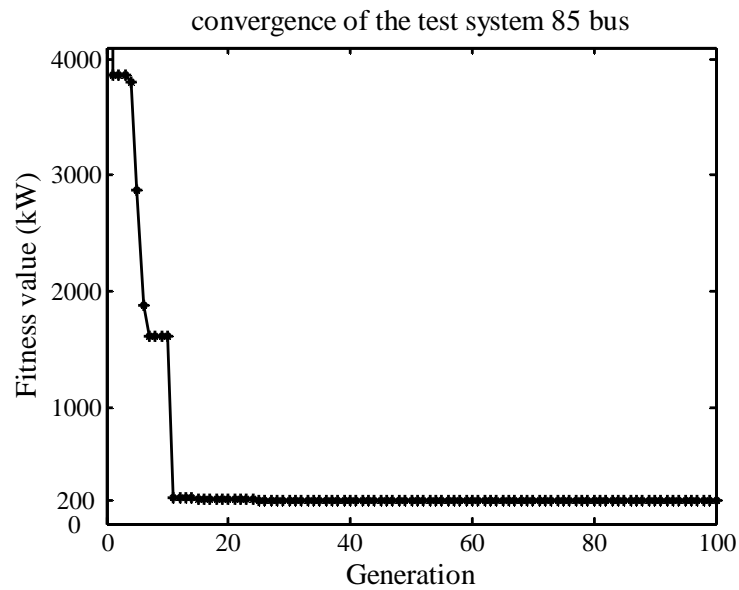
รูปที่ 5.17 การหาค่าตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึมของระบบทดสอบ 69 บัส

4) ระบบทดสอบ 85 บัส

การค้นหาค่าติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG สำหรับระบบทดสอบ 85 บัส หาได้ โดยการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 54 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 และการดูเข้าของการค้นหาด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังรูปที่ 5.19 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.18 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง DFIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง เนื่องจากแรงดันของระบบทดสอบ 85 บัสก่อนการติดตั้งมีค่าต่ำมาก ทำให้การติดตั้ง DFIG ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถยกระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟตัวอื่นเพิ่ม เช่น ตัวเก็บประจุ หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบสถิต จะสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ พิจารณาการดูเข้าหาค่าตอบของการค้นหาด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.19 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 202.7238 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ กำลังไฟฟ้าจริง 3.3057 p.u. กำลังไฟฟารีแอกทีฟ 3.9052 p.u. ค่าสลิป 6.01% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0359 p.u. ซึ่งเป็นจุดทำงานของ DFIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 315.7013 kW ลดลงเป็น 202.7238 kW หลังการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 54 คิดเป็น 35.7862% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 85 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



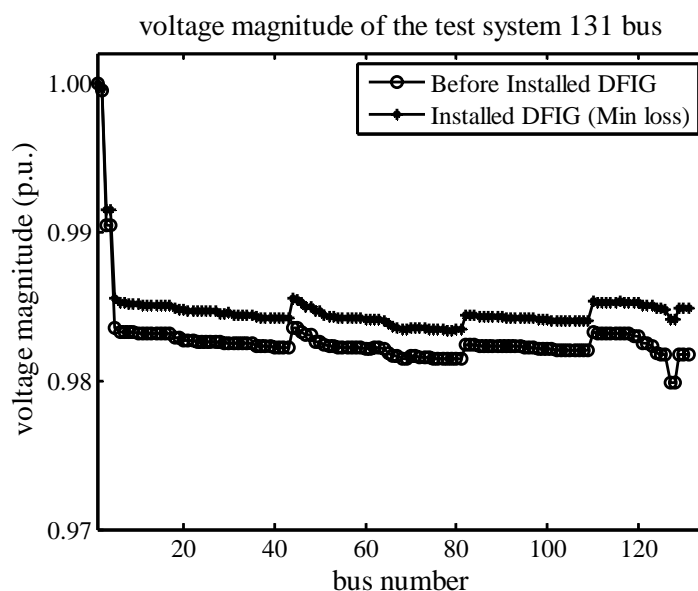
รูปที่ 5.18 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 54 ด้วยขนาดติดตั้งเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 85 บัส



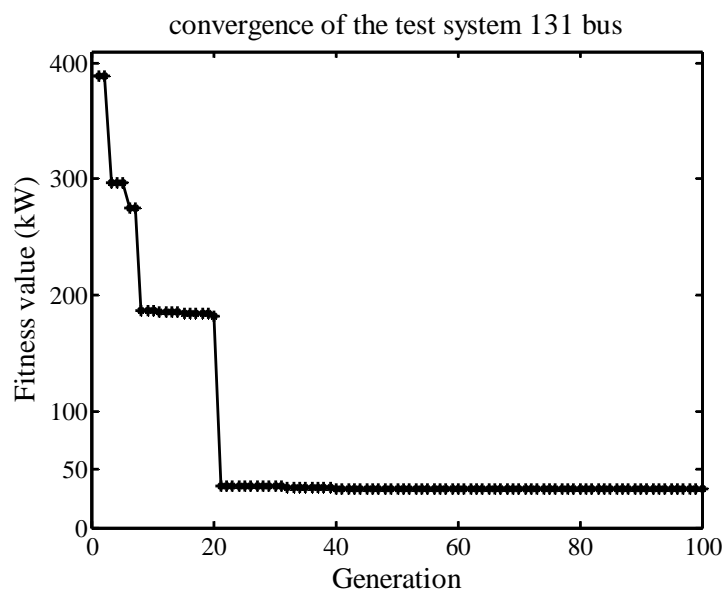
รูปที่ 5.19 การลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึมของระบบทดสอบ 85 บัส

5) ระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

การค้นหาค่าติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG สำหรับระบบทดสอบ 131 บัส หาได้โดยการติดตั้ง DFIG ที่บัส 128 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดและเป็นบัสที่เสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด จากนั้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของ DFIG โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งก่อนและหลังติดตั้ง DFIG แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 และการดูเข้าของการค้นหาด้วยเงินเนติกอัลกอริทึมแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.20 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง DFIG มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบก่อนการติดตั้ง และระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบหลังการติดตั้ง อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด พิจารณาการดูเข้าหาคำตอบของการค้นหาด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม ในรูปที่ 5.21 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบหลังการติดตั้ง คือ 33.5292 kW จุดทำงานที่เหมาะสมของ DFIG ที่ทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดคือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง 3.9823 p.u. กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 3.8105 p.u. ค่าสลิป 4.78% และแรงดันด้านโรเตอร์ 0.0360 p.u. ซึ่งเป็นจุดทำงานของ DFIG ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้งจาก 45.6667 kW ลดลงเป็น 33.5292 kW หลังการติดตั้ง DFIG ที่บัสที่ 128 คิดเป็น 26.5784% ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้ระบบทดสอบ 131 บัส มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด



รูปที่ 5.20 ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง DFIG ที่บัส 128 ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ 5.21 การหาค่าตอบของการค้นหาขนาดของ DFIG ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม
ของระบบทดสอบ 131 บัส

5.4 สรุป

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อช่วยให้โหลดส่วนใหญ่ของระบบได้รับการป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบในภาพรวม โดยการระบุตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พิจารณาจากบัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด พบว่าบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งบัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้จินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ติดตั้งในระบบเกิดผลดีต่อระบบมากที่สุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสม ทำให้บัสปลายทางมีขนาดแรงดันสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลง และเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้แรงดันบัสทุกบัสหลังการติดตั้ง

มีขนาดมากกว่าแรงดันบั๊สก่อนการติดตั้ง และกำลังงานสูญเสียในระบบสายป้อนทั้งหมดมีค่าต่ำที่สุด

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าและการหาค่าเหมาะที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงานในสถานะคงตัว ในรูปของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยนำเสนอกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองชนิด คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน ซึ่งได้กล่าวถึงแบบจำลองสองแบบ ได้แก่แบบจำลองกำลังไฟฟ้าและแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเรื่องอื่น ๆ เช่น การคำนวณกำลังงานสูญเสีย การพิจารณาแรงดันตก รวมถึงการวางแผนการจ่ายโหลดไปยังผู้ใช้ไฟตามสถานีต่าง ๆ วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้ทำการจำลองผลในกรณีต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการจ่ายโหลดอย่างสมดุล สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม พิจารณาจากบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม และบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ส่วนขนาดติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค้นหาโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จำลองผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1) พัฒนาแบบจำลองในสถานะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเสนอกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองชนิด คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดจ่ายสองด้าน ซึ่งกล่าวถึงแบบจำลองสองแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า ซึ่งกล่าวถึงสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ซึ่งกล่าวถึงการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ เนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบ ส่งผลให้เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย รวมถึงการหาผล

ผลการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองในสถานะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองชนิด และทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอโดยทดสอบกับระบบทดสอบ 5 ระบบ ได้แก่ ระบบทดสอบ 15 บัส 34 บัส 69 บัส 85 บัส และระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ซึ่งระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบทดสอบแบบสมมูล โดยการกำหนดตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบ จากนั้นหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าที่ได้ ลำดับต่อมาศึกษาผลของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบสำหรับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละชนิด จากผลการทดสอบพบว่า การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบ ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าสูงขึ้น เสถียรภาพแรงดันของระบบก็มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และกำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าลดลง

2) นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม โดยพิจารณาเป็นสองกรณี กรณีแรกพิจารณาดำเนินการติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสโหลดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพมากที่สุดในรูปของการประเมินบัสอ่อนแอ ด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดัน FVSI ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้านิวตันที่บัสโหลด บัสที่มีค่าการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้านิวตันที่ได้น้อยที่สุดเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด กรณีที่สองพิจารณาดำเนินการติดตั้งที่เหมาะสมจากตำแหน่งของบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด สำหรับการค้นหาตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ทำได้โดยการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้จินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งทั้งตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและตำแหน่งบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3) นำเสนอการเปรียบเทียบตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างบัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสที่มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยการทดลองติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งบัสดังกล่าวด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุด โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้านิวตันที่โหลดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระบบขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่บัสไหนทำให้ระบบสามารถรับกำลังไฟฟ้านิวตันที่โหลดได้มากที่สุด แสดงว่าบัสนั้นเป็นบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า บัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

4) นำเสนอการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ส่วนการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเลือกใช้เงินเนติกอัลกอริทึม ดำเนินการโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้แก่ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง ขนาดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสม ทำให้บัสปลายทางมีขนาดแรงดันสูงขึ้น และกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลง และเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้แรงดันบัสทุกบัสหลังการติดตั้งมีขนาดมากกว่าแรงดันบัสก่อนการติดตั้ง และกำลังงานสูญเสียในระบบสายป้อนทั้งหมดมีค่าต่ำที่สุด

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) การหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI กับระบบทดสอบที่มีขนาดใหญ่ เช่น ระบบทดสอบ 69 บัส 85 บัสและระบบทดสอบสายป้อนนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก เพราะระบบทดสอบสามารถย้ายโหนดได้มากสำหรับโหนดที่ค้นหา ดังนั้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอย่างต่อเนื่องด้วยค่าลำดับขั้นน้อยประมาณ 0.1-0.2 p.u. ต้องใช้การวนรอบหลายครั้ง ซึ่งควรใช้ค่าลำดับขั้นที่มากกว่านี้ ส่วนโหนดปลายทางค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่รับได้มีขนาดไม่สูงมากนัก อาจจะใช้ค่าลำดับขั้นที่น้อยได้

2) วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น โดยติดตั้งที่บัสที่อ่อนแอที่สุด สำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง การพิจารณาดำเนินการติดตั้งอาจแตกต่างกันได้ เช่น การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบสองตำแหน่ง อาจติดตั้งที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอันดับหนึ่งและอันดับสอง หรืออาจติดตั้งที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด หรืออาจติดตั้งที่ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดอันดับหนึ่งและบัสที่อ่อนแอที่สุดหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตำแหน่งแรก ซึ่งจะต้องพิจารณาโดยละเอียด เพื่อให้เกิดผลดีต่อระบบมากที่สุด

3) การหาค่าเหมาะสมที่สุดของตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเมื่อระบบทดสอบมีขนาดใหญ่ ทำให้การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมไม่เหมาะกับระบบที่ต้องการความเร็วในการค้นหา ทั้งนี้อาจเลือกวิธีการค้นหาอื่นที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันแต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาประยุกต์ใช้ เช่น การโปรแกรมวิวัฒนาการหรือการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- ทศพล รัตน์นิยมชัย (2549). การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 111-114.
- ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2549). ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. **เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 143-145.
- ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2549). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. **เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 103-107.
- ประมวล แสงสารวัตร และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2550). แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง. **การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 (ENETT2550)**.
- Abbey, C. and Joo, G. (2004). Optimal Reactive Power Allocation in a Wind Powered Doubly-Fed Induction Generator. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, (2): 1491-1495.
- Abdul Rahman, T.K. and Jasmon, G.B. (1995). A New Technique for Voltage Stability Analysis in a Power System and Improved Load flow Algorithm for Distribution Network. **Proc. EMPD'95 Int. Conf. Energy Management and Power Delivery**, (2): 714-719.
- Banakar, H., Luo, C., and Ooi, B. T. (2006). Steady-state Stability Analysis of Doubly-Fed Induction Generators Under Decoupled P-Q Control. In **Proceeding of IEE Electric Power Applications 2006** (pp 300-306).
- Baozhu, L. and Bolong, L. (2008). A Novel Static Voltage Stability Index based on Equilibrium Solution Region of Branch Power Flow. **Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**, 809-814.
- Boyle, G. (2000). **Renewable Energy: Power for Sustainable Future**, Oxford University Press.
- Brown, R.E., Pan, J., Feng, X., and Koutlev, K. (2001). Siting Distributed Generation to Defer T&D Expansion. **Transmission and Distribution Conference and Exposition**, 622-627.

- Chattopadhyay, D., Bhattacharya, K., and Parikh, J. (1995). Optimal Reactive Power Planning and Its Spot-Pricing: an Integrated Approach. **IEEE Transaction on Power System**, 10(4): 2014-2020.
- Chen, H., Chen, J., Shi, D., and Duan, X. (2005). Multi-stage Dynamic Optimal Power Flow in Wind Power Integrated System. **Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific**, 1-5.
- Feijoo, A.E. and Cidras, J. (2000). Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, 15(1): 110-115.
- Holdsworth, L., Wu, X. G., Ekanayake, J. B., and Jenkins, N. (2003). Direct Solution Method for Initialising Doubly-Fed Induction Wind Turbines in Power System Dynamic Models. In **Proceeding of IEE Gener. Transm. Distrib. 2003** (pp 334-342).
- Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D., and Strbac, G. (2000). **Embedded Generation**. The Institute of Electrical Engineers.
- Kulworawanichpong, T. and Sangsarawut, P. (2007). Power Flow Modelling of a Self-Excited Induction Generator. In **Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE2007) 2007** (pp378-383). London, U.K.
- Lei, Y., Mullane, A., Lightbody, G., and Yacamini, R. (2006). Modeling of the Wind Turbine With a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 21(1): 257-264.
- Mardaneh, M. and Gharehpetian, G.B. (2004). Siting and Sizing of DG Units Using GA and OPF Based Technique. **IEEE Region 10 Conference (TENCON 2004)**, 331-334.
- Musirin, I. and Abdul Rahman, T.K. (2002). Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System. In **Student Conference on Research and Development Proceedings 2002** (pp265-268). Shah Alam, Malaysia.
- Musirin, I. and Abdul Rahman, T.K. (2002). On-Line Voltage Stability Based Contingency Ranking Using Fast Voltage Stability Index (FVSI). **IEEE/PES. Transmission and Distribution Conf. and Exhibition**, (2): 1118-1123.
- Panda, D., Benedict, E. L., Venkataramanan, G., and Lipo, T. A. (2001). A novel control strategy for the rotor side control of a doubly-fed induction machine. **IEEE Thirty-Sixth IAS Annual Meeting**. 1695-1702.

- Rahman, T.K.A., Rahim S.R.A., and Musirin, I. (2004). Optimal Allocation and Sizing of Embedded Generators. In **Proceedings of the National Power & Energy Conference 2004** (pp288-294). Kuala Lumpur, Malaysia.
- Saadat, H. (2004). Power System Analysis. **McGraw-Hill**.
- Stagg, G.W. and El-Abiad, A.H. (1968). Computer methods in power system analysis. **Singapore: McGraw-Hill**.
- Tapia, A., Tapia, G. Ostolaza, J. X., Saenz, J. R., Criado, R., and Berasategui J. L. (2001). Reactive Power Control of a Wind Farm made up with Doubly Fed Induction Generators (I). **IEEE Porto Power Tech Conference**. Porto, Portugal.
- Tapia, A., Tapia, G. Ostolaza, J. X., Saenz, J. R., Criado, R., and Berasategui J. L. (2001). Reactive Power Control of a Wind Farm made up with Doubly Fed Induction Generators (II). **IEEE Porto Power Tech Conference**. Porto, Portugal.
- Tennakoon, A. P., Arulampalam, A., Ekanayake, J. B., and Abeyratne. (2006). Modeling and Control of Doubly Fed Induction Generators (DFIGs) For Wind Energy Applications. **International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)** (pp200-207). Sri Lanka.
- Zhiqun, W., Shouzhen, Z., and Shuangxi, Z. (2004). Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile. **Automation of Electric Power System**, 28(16): 56-60.
- Zhu, Y. and Tomsovic, K. (2002). Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems With Dispersed Generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 17(3): 822-827.

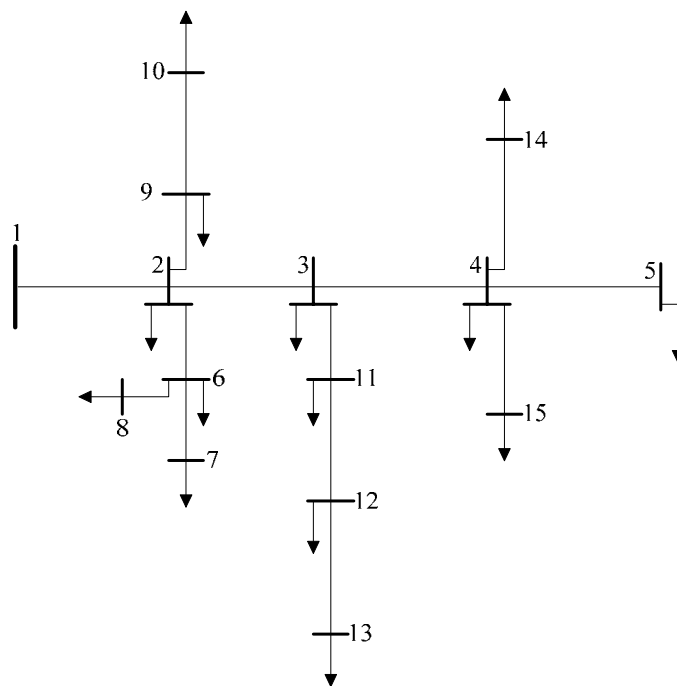
ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ

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

ก.1 ระบบทดสอบ 15 บัส



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 15 บัส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 15 บัส

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

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 15 บัส (ต่อ)

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

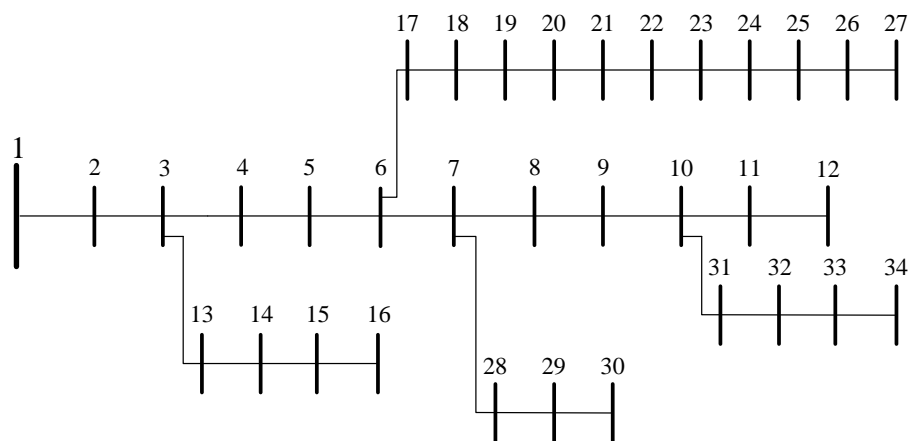
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 15 บัส

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

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 15 บัส (ต่อ)

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

ก.2 ระบบทดสอบ 34 บัส



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 34 บัส

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 34 บัส

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

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 34 บัส (ต่อ)

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

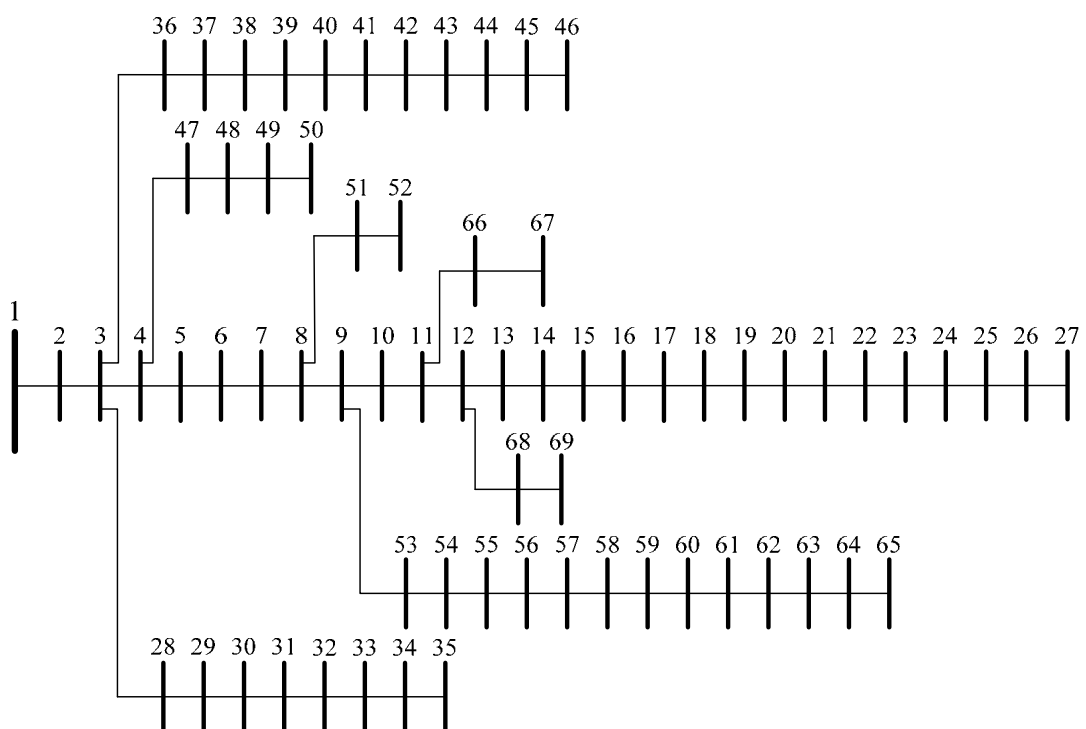
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 34 บัส

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

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 34 บัส (ต่อ)

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

ก.3 ระบบทดสอบ 69 บัส



รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ 69 บัส

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 69 บัส

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

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
55	1.00	0.0	0.0	0.0	24	17.2	PQ bus
56	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
57	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
58	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
59	1.00	0.0	0.0	0.0	100	72	PQ bus
60	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
61	1.00	0.0	0.0	0.0	1,244	888	PQ bus
62	1.00	0.0	0.0	0.0	32	23	PQ bus
63	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	PQ bus
64	1.00	0.0	0.0	0.0	227	162	PQ bus
65	1.00	0.0	0.0	0.0	59	42	PQ bus
66	1.00	0.0	0.0	0.0	18	13	PQ bus
67	1.00	0.0	0.0	0.0	18	13	PQ bus
68	1.00	0.0	0.0	0.0	28	20	PQ bus
69	1.00	0.0	0.0	0.0	28	20	PQ bus

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส

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

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

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

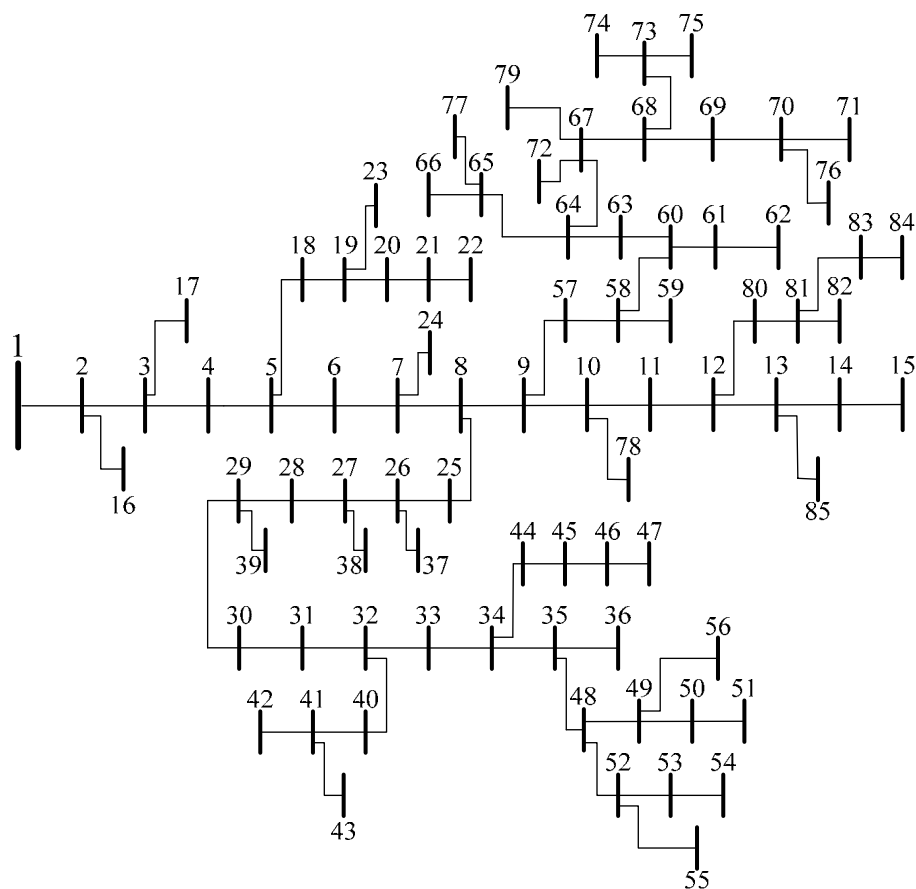
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

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

ก.4 ระบบทดสอบ 85 บัส



รูปที่ ก.4 ระบบทดสอบ 85 บัส

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 85 บัส

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

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส

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

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

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

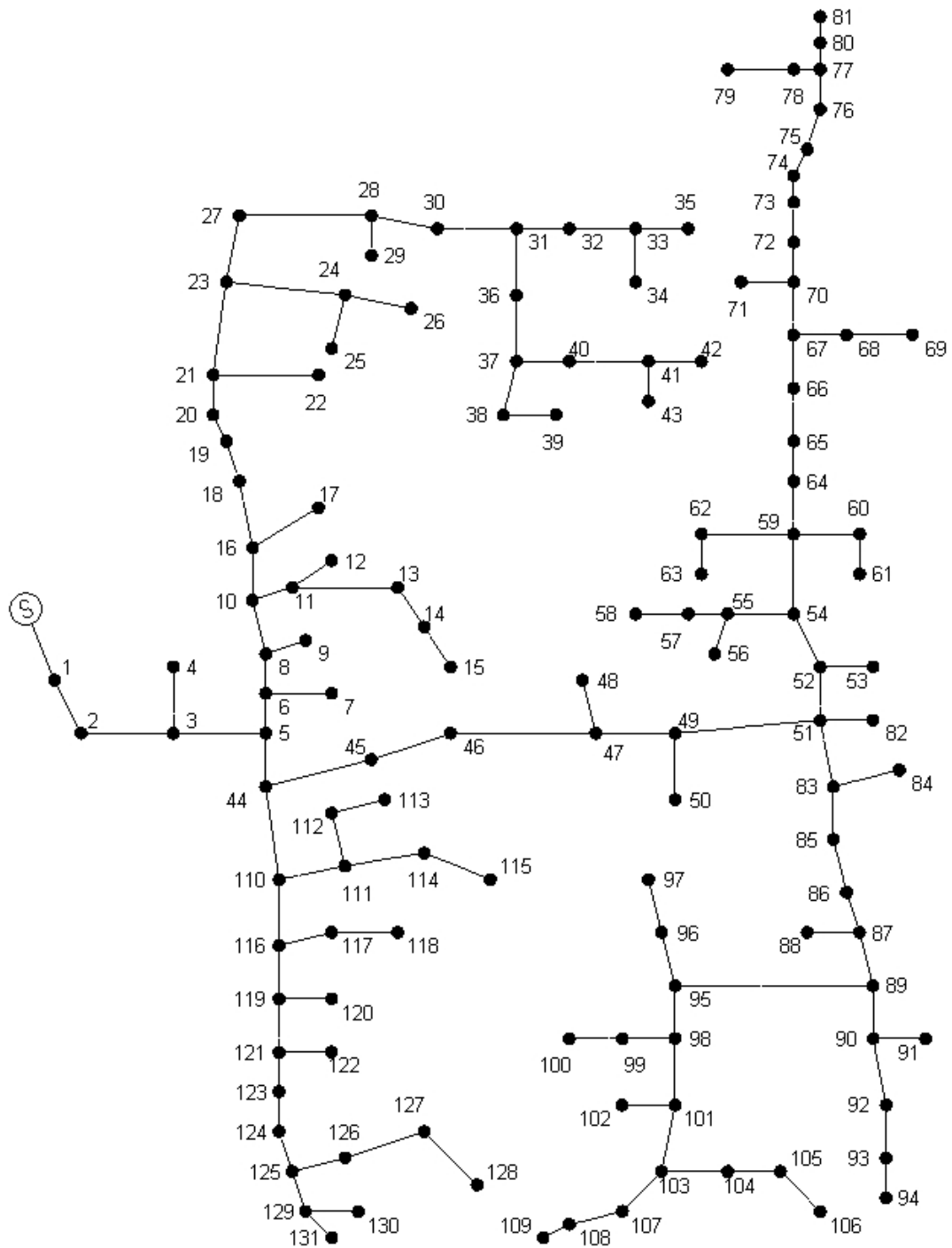
ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 85 บัส (ต่อ)

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

ก.5 ระบบทดสอบ 131 บัส



รูปที่ ก.5 ระบบทดสอบ 131 บัส

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส

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

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส

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

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 131 บัส (ต่อ)

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

ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. ประมวล แสงสารวัตร และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2550). **แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง**. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 (ENETT2550).

2. Kulworawanichpong, T. and Sangsarawut, P. (2007). **Power Flow Modelling of a Self-Excited Induction Generator**. In Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE2007) 2007 (pp378-383). London, U.K.

การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3
23-25 พฤษภาคม 2550 โรงแรมโมทยาภยา จังหวัดกรุงเทพฯ

แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง Power flow models of a self-excited induction generator

ประมวล แสงสารวัตร และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 044-224400 โทรสาร 044-224601 Email: thanatchai@gmail.com

Pramual Sangsarawat and Thanatchai Kulworawanichpong
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
Muang District, Nakorn Ratchasima 30000 Thailand Tel: 044-224400 Fax: 044-224601 E-mail: thanatchai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง เพื่อใช้สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นผลมาจาก การต่อเชื่อมโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลมเป็นตัวต้นกำลัง เป็นต้น โดยนำเสนอแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองรวมทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองมีสควมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการสูญเสีย และความแม่นยำของแบบจำลอง เพื่อนำไปทำนายผลของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง ที่เป็นผลมาจากการต่อเชื่อมโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบ ผลจากการนำเสนอแบบจำลองนี้ ช่วยให้คำนวณแรงดันที่จุดต่าง ๆ ในระบบ กำลังงานสูญเสียในระบบ ตลอดจนใช้วินิจฉัยและแสวงหาแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ เช่น แรงดันตกในระบบ หรือการลัดวงจร เป็นต้น เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบสายป้อน 22 KV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา ถูกนำมาประเมินผล ผลการวิจัยที่ได้จะเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อป้องกันปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับและการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

Abstract

This paper presents power flow models of a self-excited induction generator. These models is used for steady state power flow calculation in electric power systems which a generating plant driven by renewable energy sources, such as wind energy, is connected to serve loads. This research demonstrates the induction generator by two forms: i) power model ii) voltage bus control model and iii) admittance model. Solution convergence

and model accuracy are carefully observed in order to predict power flow distribution through feeder lines resulting from the grid connection of a renewable power plant. From the proposed models, voltage profiles and power losses of the system can be calculated. To verify the models, standard IEEE 37-node, 118 node and a PEA's 22-kV distribution power system in Nakhon Ratchasima are evaluated. In addition, satisfactory results can be employed to develop system stability analysis and operation planning in order to prevent supply service interruption and conserve electrical energy.

1. บทนำ

พลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานลม พลังงานจากคลื่นทะเล หรือ อื่น ๆ ได้รับการสนับสนุนขึ้นมาเป็นพลังงานทางเลือก เพื่อเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานสำรอง และเป็นทางเลือกในการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) ที่มีราคาแพงกว่าและมีปริมาณจำกัด การเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนย่อมส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่อเชื่อมอยู่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ถึงแม้ว่าโรงไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์ในการผลิตกำลังงานไฟฟ้า กรณีของโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมีจำนวนไม่น้อยที่ใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเหตุผลบางประการ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed generators : DGs) คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (น้อยกว่า 15 MW) [1] ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) กังหันลม (wind turbines) หรือ กังหันน้ำขนาดเล็ก (small-scale hydraulic turbines) เป็นตัวต้นกำลังที่ติดตั้งเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปยังระบบ และเรียกระบบส่งจ่ายที่มีการติดตั้ง DGs ว่า distributed generation (DG) โดยส่งผลให้เกิดข้อดี คือ ช่วยลดต้นทุนการนำเข้าพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำงานของ DG ส่วนใหญ่

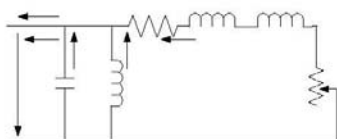
มาจากแหล่งพลังงานที่ไม่หมดสิ้น ผลจากการติดตั้งนี้ย่อมทำให้จุดการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า การกระจายของขนาดแรงดันตลอดระยะเวลาของสายป้อน หรือกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งระบบ เป็นต้น ดังนั้น การเพิ่ม DG เข้าไปในระบบ ต้องผ่านการวิเคราะห์ความมั่นคงในระบบอย่างรอบคอบเพื่อให้ DG ที่ติดตั้งช่วยทำให้ความเชื่อถือได้ในระบบเพิ่มสูงขึ้น (high reliability) ระดับแรงดันในระบบดีขึ้น (voltage profile improvement) และกำลังงานสูญเสียทั้งระบบลดน้อยลง (reduction of power loss)

บทความนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็นส่วนใหญ่ๆ ดังนี้ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า รวมทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองมีสควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ส่วนที่ 3 นำเสนอการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทั้งสามแบบจำลอง เพื่อหาผลเฉลยแรงดันและกำลังไฟฟ้าโดยสังเขป ส่วนที่ 4 นำเสนอผลการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบสายป้อน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการใช้ และ ความแม่นยำของแบบจำลอง

2. แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (PQ model)

จากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นพบว่าแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง สามารถพิจารณาได้จากรูป ดังนี้



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

- เมื่อ x_s คือ stator reactance
- x_r คือ rotor reactance
- r_s คือ stator resistance
- r_r คือ rotor resistance
- x_m คือ excitation reactance
- x_c คือ capacitor banks reactance
- s คือ slip of induction generator

จากวงจรมูลสามารถคำนวณหากระแสที่ไหลในแต่ละจุด ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{-(sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} + j \frac{(s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{-V \sin \delta + jV \cos \delta}{x_m} \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{V \sin \delta - jV \cos \delta}{x_c} \quad (3)$$

คำนวณหากระแสทั้งหมด จาก $I = I_1 + I_2 + I_3$ จะได้

$$I = \frac{-(sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \sin \delta}{x_p} + j \left(\frac{(s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \cos \delta}{x_p} \right) \quad (4)$$

เมื่อ $x = x_1 + x_2$, $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}$ และไม่พิจารณาผลของ r_1

คำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ และจัดรูปสมการ

$$S = VI^* = P + jQ$$

จะได้

$$P = -\frac{sr_2V^2}{r_2^2 + s^2x^2} \quad (5)$$

$$Q = -\left(\frac{s^2xV^2}{r_2^2 + s^2x^2} + \frac{V^2}{x_p} \right) \quad (6)$$

หรือ

$$Q = \frac{Pxx}{r_2} - \frac{V^2}{x_p} \quad (7)$$

จากสมการ (5) สามารถจัดรูปสมการ ได้ดังนี้

$$s = \frac{-V^2r_2 + \sqrt{V^4r_2^2 - 4P^2x^2r_2^2}}{2Px^2} \quad (8)$$

ขนาดของกำลังไฟฟ้าที่เข้าที่ ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ โดยพิจารณาจาก (7) และ (8) จะได้

$$Q = \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2x^2}}{2x} - \frac{V^2}{x_p} \quad (9)$$

เนื่องจาก DG ไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความถี่ [2] ดังนั้น สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ที่พิจารณากำลังไฟฟ้าจริงของ DG เป็นค่าคงที่ จะได้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่สามารถอธิบาย ได้ดังนี้

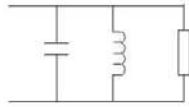
$$\begin{cases} P = P_e \\ Q = f(V) \end{cases} \quad (10)$$

การกำหนดค่าเริ่มต้นของกำลังไฟฟ้าจริงของ DG เป็นค่าคงที่ ต้องอยู่ในขอบเขตที่ไม่ทำให้ค่าสลิปในสมการ (8) เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งค่าของกำลังไฟฟ้าจริง ต้องสอดคล้องกับสมการ

$$V^4r_2^2 - 4P^2x^2r_2^2 \geq 0 \quad (11)$$

2.2 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Admittance model)

จากวงจรมูลในรูปที่ 1 สามารถเขียนวงจรใหม่ ได้ดังนี้



รูปที่ 2 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งยูนิต

จากรูปที่ 2 จำนวนอิมพีแดนซ์รวมของวงจร ได้ดังนี้

$$Z_g = -jx_c // jx_m // (r_2/s + jx) \quad (12)$$

ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจร

$$Y_g = \frac{1}{-jx_c} + \frac{1}{jx_m} + \frac{1}{r_2/s + jx} \quad (13)$$

จะได้

$$Y_g = \frac{sr_2}{r_2^2 + s^2x^2} - j \frac{r_2^2 + s^2x^2 + x_p s^2x}{x_p(r_2^2 + s^2x^2)} \quad (14)$$

3. การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษากาการไหลของกำลังไฟฟ้า หรือที่รู้จักกันในชื่อ power flow ซึ่งรูปแบบของปัญหาจะเป็นการหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละสายส่ง ตลอดจนการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยในการแก้ปัญหาจะพิจารณาในระบบภายใต้ balance condition และใช้ single phase model ในการทดสอบ

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

3.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า

สำหรับขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่โหนดที่มีการติดตั้ง DG คือ

$$\Delta P_i = P_i^{sch} + \sum_{k=1}^m P_{ik} - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (15)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sch} + \sum_{k=1}^m Q_{ik} + \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0$$

เมื่อ m คือ จำนวน DG ทั้งหมดที่ติดตั้งที่โหนด i

P_{ik} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของ DG ตัวที่ k ที่ติดตั้งที่โหนด i

Q_{ik} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ DG ตัวที่ k ที่ติดตั้งที่โหนด i

โดย Q_{ik} จำนวนได้จาก (9) ดังนั้น การคำนวณการไหลของ

กำลังไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน ต้องมีการปรับค่า $\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} V_i$

ในจาโคเบียนเมตริกซ์ ในทุกๆ รอบการคำนวณ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงของ DG ที่ติดตั้งในระบบ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก
2. คำนวณค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบ จากข้อมูลสายส่งในรูประบบต่อหน่วย
3. คำนวณค่าสลิตจาก (8) และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจาก (7) หรือ (9)
4. คำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน โดยใช้สมการ (15) สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่โหนดที่มีการติดตั้ง DG
5. ปรับปรุงขนาดและมุมเฟสแรงดันไฟฟ้า และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ให้กลับไปคำนวณในขั้นตอนที่ 3
6. ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ
7. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง (line flow) แต่ละเส้นและค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า (power losses) จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้

3.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์

พิจารณา (8) และ (14) พบว่า ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจรขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่ ดังนั้น ในขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในทุกๆ รอบการคำนวณ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอน ได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงของ DG ที่ติดตั้งในระบบ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก
2. คำนวณค่าสลิตโดย (8) คำนวณแอดมิตแตนซ์รวมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดย (14) และคำนวณค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบในรูประบบต่อหน่วย
3. คำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน
4. ปรับปรุงขนาดและมุมเฟสแรงดันไฟฟ้า และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ให้กลับไปคำนวณในขั้นตอนที่ 2
5. ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ
6. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง (line flow) แต่ละเส้นและค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า (power losses) จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้

4. ระบบทดสอบและผลการทดสอบ

การศึกษานี้จะใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบจำหน่ายทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง DG โดยเริ่มจากคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในระบบก่อนการติดตั้ง DG จากนั้นทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เมื่อมีการติดตั้ง DG เพิ่มในระบบ โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model) แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน (PV

model) และ แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (Admittance model) โดย DG ทุกตัวที่ติดตั้งในระบบมีค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

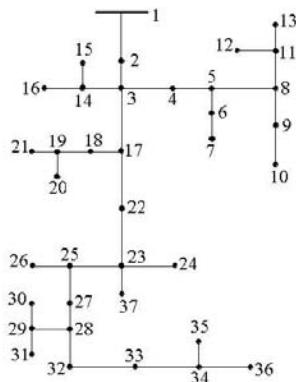
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [3]

พารามิเตอร์	$x_d/p.u.$	$x_q/p.u.$	$r_s/p.u.$	$x_m/p.u.$
ค่า	0.09985	0.10906	0.00373	3.54708

สำหรับระบบทดสอบที่ใช้ ได้แก่ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบจำหน่าย 22 kV ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีรายละเอียดการจำลองผลและผลการคำนวณดังต่อไปนี้

4.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด [4]

ระบบทดสอบ 37 โหนดของ IEEE ใช้กับระดับแรงดัน 4.8 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA ดังรูป

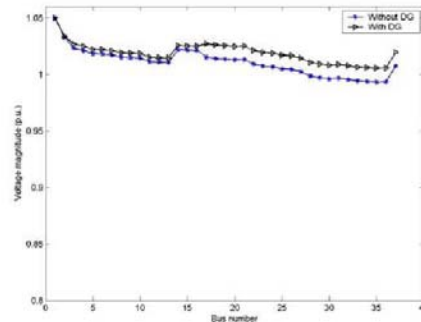


การทดสอบได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้ ไว้ที่ 1×10^{-6} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการลู่เข้า และความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเป็นแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และแบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน ในการทดลองแยกออกเป็น 4 กรณีดังนี้

ตารางที่ 2 กรณีทดสอบของระบบ 37 โหนด

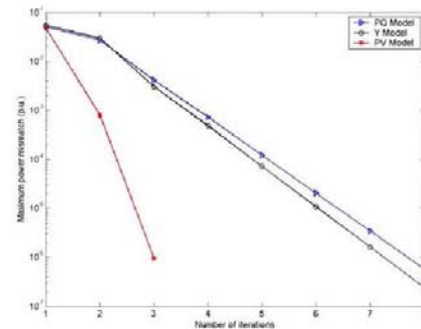
กรณี	ระบบ
1	ก่อนทำการติดตั้ง DG
2	ภายหลังติดตั้ง DG (PQ model) ที่โหนด 17
3	ภายหลังติดตั้ง DG (Y model) ที่โหนด 17
4	ภายหลังติดตั้ง DG (PV model) ที่โหนด 17

จากการทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 17 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งในรูปแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัส แสดงดังรูป



รูปที่ 4 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติด DG ในระบบ IEEE 37 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปของแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ของระบบ IEEE 37 โหนดแสดงดังรูป



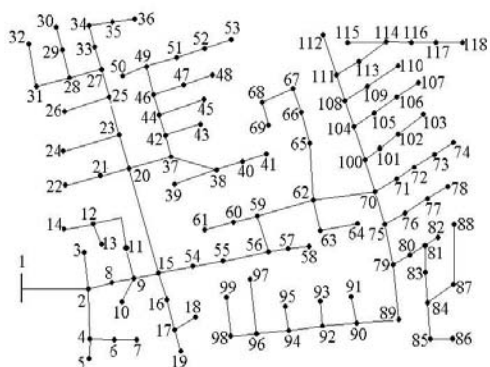
รูปที่ 5 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 37 โหนด

จากรูปที่ 4 เมื่อติดตั้ง DG เข้าไปที่ โหนด 17 และคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเพิ่ม ในรูปของแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และแบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน พบว่าผลเฉลยของแรงดันในแต่ละโหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกัน และแรงดันในแต่ละโหนดของระบบมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนติดตั้ง DG ด้วย

จากรูปที่ 5 คุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน ของการคำนวณทั้ง 3 แบบ เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ แบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และแบบจำลองกำลังไฟฟ้า

4.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 โหนด

ระบบทดสอบ 118 โหนดของ IEEE ใช้กับระดับแรงดัน 4.16 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA ดังรูป



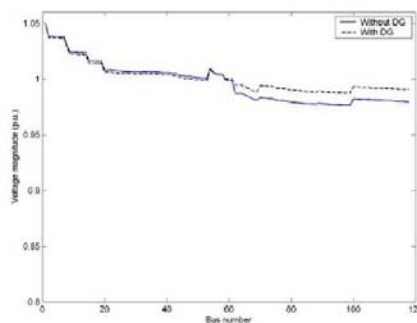
รูปที่ 6 ระบบทดสอบ IEEE 118 โหนด

การทดสอบได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้ไว้ที่ 1×10^{-6} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการลู่เข้า และความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งทั้ง 3 แบบจำลอง ในการทดลองแยกออกเป็น 4 กรณีดังนี้

ตารางที่ 3 กรณีทดสอบของระบบ 118 โหนด

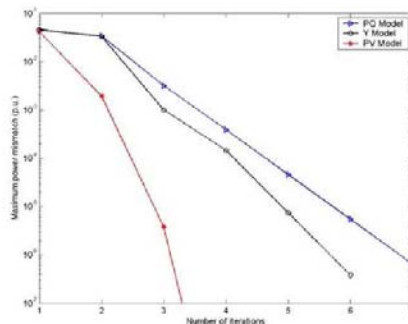
กรณี	ระบบ
1	ก่อนทำการติดตั้ง DG
2	ภายหลังติดตั้ง DG (PQ model) ที่โหนด 70
3	ภายหลังติดตั้ง DG (Y model) ที่โหนด 70
4	ภายหลังติดตั้ง DG (PV model) ที่โหนด 70

จากการทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 70 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัส แสดงดังรูป



รูปที่ 7 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติด IG ในระบบ IEEE 118 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ แบบจำลองบัสควบคุมแรงดันของระบบ IEEE 118 โหนด แสดงดังรูป



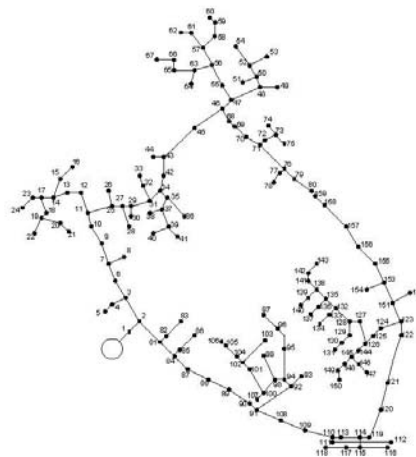
รูปที่ 8 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 118 โหนด

จากรูปที่ 7 เมื่อติดตั้ง DG เข้าไปที่ โหนด 70 และคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเพิ่ม ในรูปของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าผลเฉลยของแรงดันในแต่ละโหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกัน และแรงดันในแต่ละโหนดของระบบ โดยเฉพาะโหนดที่อยู่ใกล้เคียงกับโหนด 70 มีค่าดีขึ้นกว่าก่อนติดตั้ง DG

จากรูปที่ 8 คุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าการคำนวณด้วยแบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน มีอัตราการลู่เข้าค่าตอบเร็วที่สุด รองลงมา คือ การคำนวณด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และการคำนวณด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ

4.3 ระบบสายป้อนจำหน่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 โหนด

ระบบสายป้อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) 159 โหนด ใช้กับระดับแรงดัน 22 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA ดังรูป



รูปที่ 9 ระบบทดสอบสายป้อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 โหนด

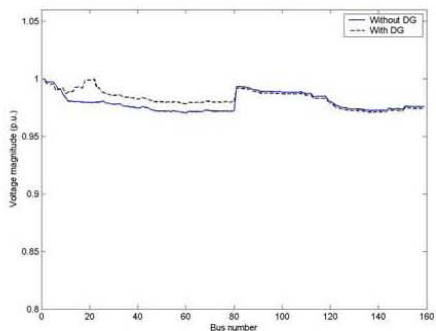
การทดสอบดำเนินการโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้ไว้ที่ 1×10^{-6} เพื่อเปรียบเทียบ

สมรรถนะในด้านอัตราการลู่เข้า และความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกติดตั้ง ในรูปของแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และแบบจำลองบัลควบคุมแรงดัน ในการทดลองแยกออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

ตารางที่ 4 กรณีทดสอบของระบบ 159 โหนด

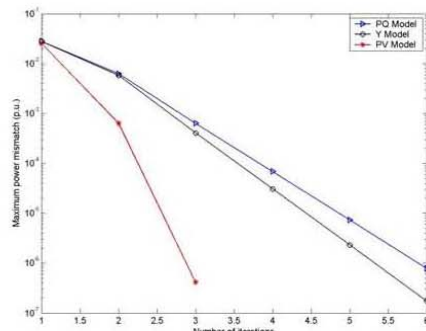
กรณี	ระบบ
1	ก่อนทำการติดตั้ง DG
2	ภายหลังติดตั้ง DG ที่โหนด 22 (PQ, Y, PV model)
3	ภายหลังติดตั้ง DG ที่โหนด 150 (PQ, Y, PV model)
4	ภายหลังติดตั้ง DG ที่โหนด 22 และ 150 (PQ, Y, PV model)

กรณีที่ 2 ทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 22 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกติดตั้ง ในรูปแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัส ดังต่อไปนี้



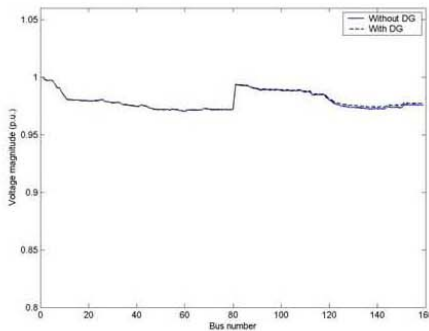
รูปที่ 10 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติดตั้ง DG ในระบบ SUT 159 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ในกรณีที่ 2 ของระบบ SUT 159 โหนด แสดงดังรูป



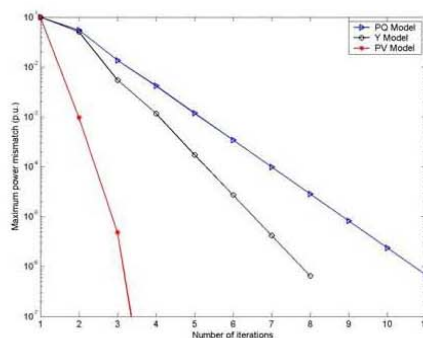
รูปที่ 11 คุณสมบัติการลู่เข้าการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด

กรณีที่ 3 ทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 150 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า ทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันดังนี้



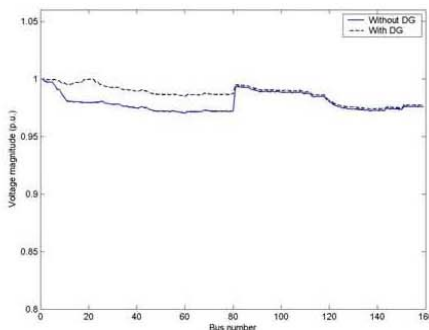
รูปที่ 12 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติดตั้ง DG ในระบบ SUT 159 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบัลควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ในกรณีที่ 3 ของระบบ SUT 159 โหนด แสดงดังรูป



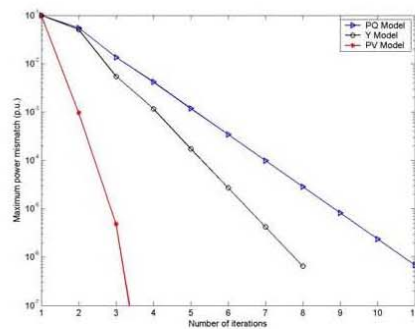
รูปที่ 13 คุณสมบัติการลู่เข้าการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด

กรณีที่ 4 ทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 22 และ โหนด 150 จากนั้นคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า ทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัส ดังต่อไปนี้



รูปที่ 14 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติดตั้ง DG ในระบบ SUT 159 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการรู้เข้าของการคำนวณผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกติดตั้ง ในรูปของแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ในกรณีที่ 4 ของระบบ SUT 159 โหนด แสดงดังรูป



รูปที่ 15 คุณสมบัติการรู้เข้าการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด

จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในการทดลองการติดตั้ง DG ในระบบ SUT 159 โหนด ที่โหนด 22 (รูปที่ 10) โหนด 150 (รูปที่ 12) และทั้งสองโหนด พร้อมกัน (รูปที่ 14) โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเพิ่ม ในรูปของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าผลเฉลยของแรงดันในแต่ละโหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกัน และแรงดันในแต่ละโหนด ในระบบทดสอบ โดยเฉพาะโหนดที่อยู่ใกล้กับโหนดที่ติดตั้ง DG เพิ่ม มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนการติดตั้ง DG ด้วย

จากรูปคุณสมบัติการรู้เข้าของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด พบว่าอัตราการรู้เข้าหาคำตอบของการคำนวณทั้ง 3 แบบ มีลักษณะเดียวกันกับผลการทดลองของระบบ IEEE 37 โหนด และ IEEE 118 โหนด

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง เพื่อใช้สำหรับกรคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยนำเสนอแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองรวมทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ จากผลการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบสายป้อน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ผลเฉลยของแรงดันในแต่ละโหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกันมาก สำหรับคุณสมบัติการรู้เข้าของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ พบว่าการคำนวณด้วยแบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน มีอัตราการรู้เข้าหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมา คือ การคำนวณด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และการคำนวณด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ และแรงดันในแต่ละโหนดของระบบ โดยเฉพาะโหนดที่อยู่ใกล้กับโหนดที่ติดตั้ง DG เพิ่ม มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีก่อนการติดตั้ง DG

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลระบบทดสอบ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] G.Celli, and F.Pilo.: "Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks". Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on, 20-24 May 2001
- [2] Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, Xianzhong Duan.: "Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation". Power Engineering Society General Meeting, on 18-22 June 2006 . IEEE
- [3] Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, Xianzhong Duan.: "Multi-stage Dynamic Optimal Power Flow in Wind Power Integrated System" Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES, 2005.
- [4] Distribution System Subcommittee, "IEEE 37 node test feeder", IEEE Power Engineering Society, 1998
- [5] Andrés E, Feijóo and José Cidrás.: "Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 15, NO. 1, February 2000
- [6] Y.Zhu, K.Tomsovic.: "Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems With Dispersed Generation", IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827
- [7] Wang Zhiqun, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi et al, "Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile", Automation of Electric Power System, 2004, 28(16): 56-60
- [8] M.S.Srimvas.: "Distribution load flows: A brief review", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. Volume 2, 23-27 Jan. 2000 Page(s):942 - 945 vol.2
- [9] Arturo Losi, Mario Russo.: "Dispersed Generation Modeling for Object oriented Distribution Load Flow", IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 1-9

Power Flow Modelling of a Self-excited Induction Generator

T. Kulworawanichpong and P. Sangsarawut

Abstract—This paper presents power flow models of a self-excited induction generator. These models are used for steady-state power flow calculation in electric power systems in which a generating plant driven by renewable energy sources, such as wind energy, is connected to partially serve loads. This research demonstrates the induction generator by two forms: i) power (PQ) model and ii) admittance (Y) model. Solution convergence and model accuracy are observed in order to predict power flow distribution through feeder lines resulting from the grid connection of a renewable power plant. From the proposed models, voltage profiles of the system can be calculated. To verify the effectiveness of the proposed models, standard IEEE 37-node, 118-node test feeders and a 22-kV power distribution systems in Nakhon Ratchasima, Thailand, were examined. In addition, satisfactory results can be employed to develop system stability analysis and operation planning in order to prevent supply service interruption and conserve the overall electrical energy.

Index Terms—Power flow calculation, PQ model, admittance model, self-excited induction generator.

I. INTRODUCTION

Renewable energy is energy derived from regenerative energy sources. It involves natural phenomena and comes from various resources, e.g. solar, wind, water, biomass, geothermal, etc [1]. The use of renewable energy increases gradually in the last decade to share approximately 30% energy use worldwide. Due to the energy crisis, the electric power industry could have a major impact on renewable energy consumption. With their limitations, a renewable-energy power plant is installed locally and equipped with a small-size generator, up to only a few MW rating [2]. Therefore, they can be located close to their local customers. Large power flowing from the power substation through distribution feeders is reduced. This concept is called distributed power generation. It permits local consumers to generate electricity for their own. A distributed generation plant normally uses a conventional synchronous generator.

Manuscript received March 5, 2007. This work was financially supported by Suranaree University of Technology.

T. Kulworawanichpong is with Power and Energy Research Unit, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 THAILAND (corresponding author, e-mail: thanatchai@gmail.com).

P. Sangsarawut is with Power and Energy Research Unit, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 THAILAND (e-mail: Sangsarawut_p@hotmail.com).

However, in particular, some distributed generating plant employs induction generators equipped with power electronic controllers. Induction generators are found in all fixed speed, network connected wind turbines and also in a small-scale hydro plant. The use of induction generators in the future requires distribution system engineers to take into account its impact in the system planning. To install a new induction generator at a particular location, investment and operating costs are very important. Therefore, one of the planner's goals is to minimize overall cost [3-5]. When the distribution power network structure is assumed to be invariable during the planning period, changes in load energy demand or the appearance of new loads over short period could require some action from existing reactive power equipment or investments for network upgrade might be necessary. Analysis of distribution power flow resulting from operation of an induction generator at a given location is a basic tool. It is able to further analyze some key system performances in several aspects, e.g. stability, security, economic, reliability, etc. In this paper, a self-excited induction generator running at a particular steady-state operating point is investigated to determine its significant effects on voltage profiles in power distribution systems. Its power flow models are proposed in order to obtain a single operating-point voltage solution of the entire system.

In this paper, modelling of a self-excited induction generator is proposed in Section 2. Section 3 gives solution methodology described step-by-step. Simulation results and conclusion are in Section 4 and 5, respectively.

II. MODELLING OF A SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR

A. PQ Model

The steady-state equivalent circuit of a self-excited induction generator (SEIG) is shown in Fig. 1 [6-8].

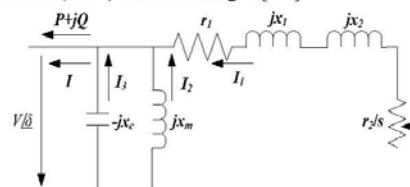


Fig. 1 Steady-state equivalent circuit of a SEIG

Where x_1 is the stator reactance

x_2 is the rotor reactance referred to the stator side

r_1 is the stator resistance

r_2 is the rotor resistance referred to the stator side

x_m is the excitation reactance

x_c is the power-factor-correction capacitor

s is the slip of the induction generator

V is the voltage magnitude of the generator terminal

δ is the phase angle of the generator terminal voltage

Due to the relationship between real power exported and reactive power drawn, independent control of the power factor of the self-excited induction generator by itself is not available [2]. To achieve the power factor control, an appropriate capacitor is placed across its terminal. From the equivalent circuit, I_1 , I_2 and I_3 can be expressed as follows.

$$I_1 = \frac{-(sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} + j \frac{(s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{-V \sin \delta + jV \cos \delta}{x_m} \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{V \sin \delta - jV \cos \delta}{x_c} \quad (3)$$

The current injected by the induction generator is the summation of (1) – (3), thus

$$I = - \left(\frac{sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta}{r_2^2 + s^2x^2} + \frac{V \sin \delta}{x_p} \right) + j \left(\frac{s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \cos \delta}{x_p} \right) \quad (4)$$

where $x = x_1 + x_2$, $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}$ and assume that $r_1 \ll r_2$

The complex power, $S = VI^* = P + jQ$, injected to the point of connection can be decomposed into real and imaginary parts as given in (5).

$$P = - \frac{sr_2V^2}{r_2^2 + s^2x^2} \quad (5)$$

$$Q = - \left(\frac{s^2xV^2}{r_2^2 + s^2x^2} + \frac{V^2}{x_p} \right) \quad (6)$$

or

$$Q = \frac{Psx}{r_2} - \frac{V^2}{x_p} \quad (7)$$

From (5) when P and V are defined, the corresponding machine slip and reactive power imported can be obtained by

$$s = \frac{-V^2 r_2 + \sqrt{V^4 r_2^2 - 4P^2 x^2 r_2^2}}{2Px^2} \quad (8)$$

The slip must be a negative real number. To avoid obtaining a complex slip, the condition described in (9) must be held.

$$V^4 r_2^2 - 4P^2 x^2 r_2^2 \geq 0 \quad (9)$$

$$Q = \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2 x^2}}{2x} - \frac{V^2}{x_p} \quad (10)$$

With (5) and (10) the SEIG can be represented by the real power injection P to and the reactive power drawn Q from the connection point. This PQ model is repeatedly updated during the iterative power flow process. As can be seen, when P is specified, Q is a function of P and V . At each iteration, starting from a previously updated voltage solution, Q is then computed. It is also subjected to a negative real slip.

B. Admittance Model

For simplification, the equivalent circuit shown in Fig. 1 is reduced to the circuit shown Fig. 2.

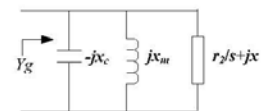


Fig. 2 Admittance model of the SEIG

The equivalent impedance Z_g of the induction generator can be simply calculated as shown in (11). Also, its equivalent admittance can be written in (12) and (13).

$$Z_g = -jx_c // jx_m // (r_2/s + jx) \quad (11)$$

$$Y_g = \frac{1}{-jx_c} + \frac{1}{jx_m} + \frac{1}{r_2/s + jx} \quad (12)$$

or

$$Y_g = \frac{sr_2}{r_2^2 + s^2x^2} - j \frac{r_2^2 + s^2x^2 + x_p s^2x}{x_p (r_2^2 + s^2x^2)} \quad (13)$$

When P and V are both assigned, the slip s can be computed. Thus, it is simple to obtain the equivalent admittance of the induction generator according to (13). The admittance model uses (13) to modify the bus admittance matrix $[Y_{bus}]$. Assume that the SEIG is connected to bus k . The k^{th} -row, k^{th} -column element of $[Y_{bus}]$ requires an update as follows.

$$[Y_{bus}]_{k,k}^{(new)} = [Y_{bus}]_{k,k}^{(old)} + Y_g \quad (14)$$

This type of modelling may cause slow convergence due to successively updating $[Y_{bus}]$.

C. PV model

In practice, at a given real power exported, the reactive power control of the induction generator is not possible. The relationship of the injected real power and the absorbed reactive power can be characterised as a circle diagram. This means that the voltage magnitude of the generator terminal cannot be regulated. Therefore, the PV model is not appropriate in this circumstance. However, some may experience that when the voltage magnitude is fixed, the iterative power flow process tends to converge rapidly. In this paper, the solution using the PV model is not established. In the later section, the PV model is employed to recalculate the power flow solutions previously obtained by using the PQ and admittance models. In this case, the voltage magnitude across the generator terminal is already known. Therefore, the PV model is applicable.

III. POWER FLOW CALCULATION

Power flow calculation is to determine a set of voltage solutions that satisfy the power mismatch equation at every node [9, 10]. The main information obtained from this calculation are phasor voltages of load buses, reactive power injection by generator buses, complex power flow through transmission lines, total power losses, etc. Connected generators at generator buses can be modelled as either PV bus or PQ bus. If the voltage magnitude at the point of connection is regulated, the PV bus model can be used. Power network solutions must satisfy a set of nodal power mismatch equations. Given that there is a total of n buses in the system and one of them is assigned as the slack bus. Decomposed power flow equations of bus k (real and reactive powers) can be simply expressed [9] as follows.

$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |V_k V_i Y_{ki}| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (15)$$

$$Q_{cal,k} = - \sum_{i=1}^n |V_k V_i Y_{ki}| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (16)$$

Where

$P_{cal,k}$ and $Q_{cal,k}$ are calculated real and reactive powers of bus k

$|V_k|$ is the voltage magnitude of bus k

δ_k is the phase angle of bus k

$|Y_{ki}|$ is the magnitude of the k^{th} -row, i^{th} -column admittance matrix element

θ_{ki} is the phase angle of the k^{th} -row, i^{th} -column admittance matrix element

The solution of the power network can be obtained by employing some efficient iterative methods, e.g. Gauss-Seidel or Newton-Raphson methods, in order to solve the power mismatch equations, $\Delta P_k = P_{cal,k} - P_{sch,k} = 0$ and $\Delta Q_k = Q_{cal,k} -$

$Q_{sch,k} = 0$ for all nodes, where $P_{sch,k}$ and $Q_{sch,k}$ are scheduled real and reactive powers of bus k .

To characterise voltage profiles of the electrical power system caused by the operation of induction generators, it assumes that the real power imported from the generator is fixed. Therefore, power flow solution can be achieved under the constant real power injection of the induction generator plant.

The iterative power flow calculation based on the PQ modelling of the induction generator can be summarised step-by-step as follows.

1. Assign an initial guess voltage solution at all buses
2. With given P and V of the induction generator bus, the slip and Q can be computed to formulate the PQ load model
3. Apply the Newton-Raphson method for obtaining voltage solutions
4. check for solution convergence

When the admittance model is applied, the step-by-step algorithm is modified slightly. During the iterative process, the bus admittance matrix is required to be updated iteratively due to the change of the machine slip at each iteration. In the same manner, the iterative power flow calculation based on the admittance model can be summarised step-by-step as follows.

1. Assign an initial guess voltage solution at all buses
2. With given P and V of the induction generator bus, the slip and therefore Y_g can be computed to formulate the admittance load model
3. Update the system bus admittance matrix
4. Apply the Newton-Raphson method for obtaining voltage solutions
5. check for solution convergence

IV. SIMULATION RESULTS

To evaluate the proposed power flow modelling, the 37-node and 118-node IEEE standard test feeders [11, 12], as shown in Figs 3 and 4, and the 159-node SUT power distribution system, as shown in Fig. 5, were used for test. All test uses the maximum allowable power mismatch of 10^{-6} p.u. as the termination criterion. Parameters of the installed induction generator [13] are given in Table 1.

Table 1. Parameter of the installed induction generator

r_2 (p.u.)	x_l (p.u.)	x_2 (p.u.)	x_m (p.u.)	x_c (p.u.)
0.00373	0.09985	0.10906	3.54708	10.6

A. The 37-node IEEE test feeder

As shown in Fig. 3, the first test feeder consists of 37 nodes with 4.8-kV and 100 kVA base. It assumes that the induction generator is installed at node 17 to serve the 30 kW load.

The obtained voltage solutions and their convergences for PQ, admittance (Y) and PV models are shown in Figs 6 - 7.

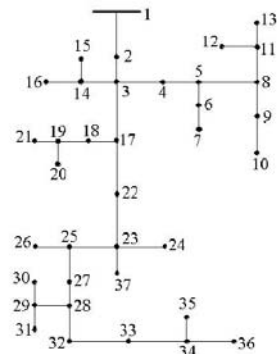


Fig. 3 37-node IEEE standard test feeder

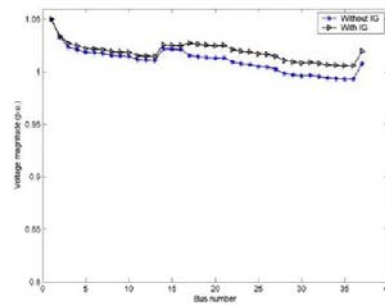


Fig. 6 Voltage solutions of the 37-node test system

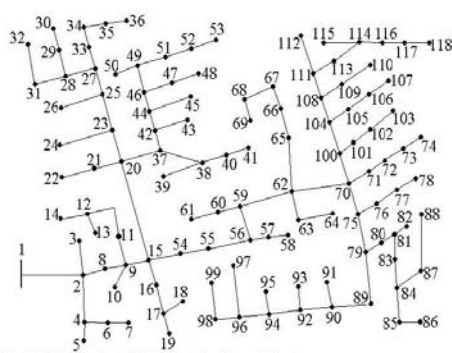


Fig. 4 118-node IEEE standard test feeder

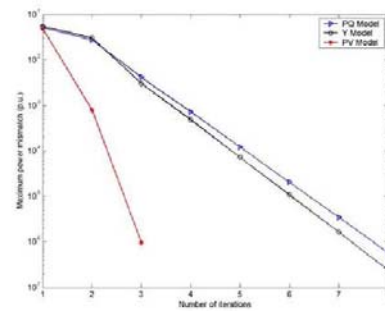


Fig. 7 Solution convergences of the 37-node test system

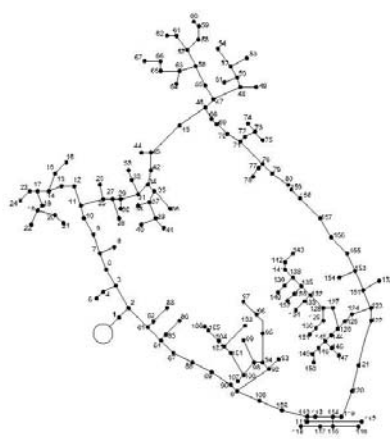


Fig. 5 159-node SUT power distribution system

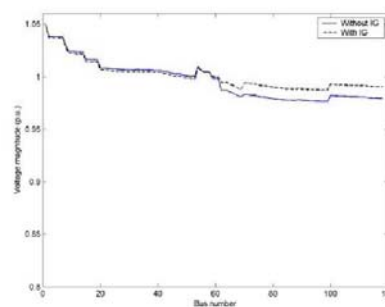


Fig. 8 Voltage solutions of the 118-node test system

B. The 118-node IEEE test feeder

As shown in Fig. 4, the second test feeder consists of 118 nodes with 4.16-kV and 100 kVA base. It assumes that the induction generator is installed at node 70 to serve the 30 kW load.

The obtained voltage solutions and their convergences for PQ, admittance (Y) and PV models are shown in Figs 8 – 9.

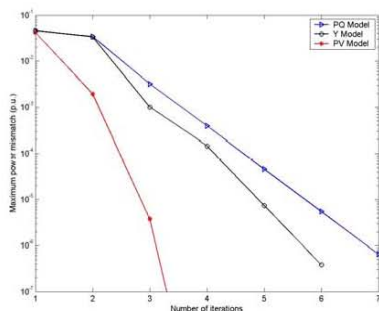


Fig. 9 Solution convergences of the 118-node test system

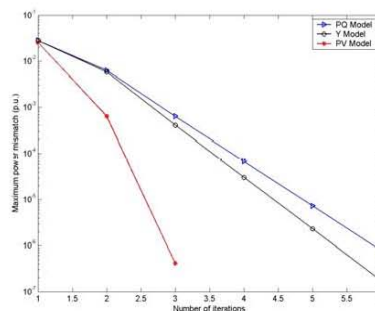


Fig. 11 Solution convergences of the SUT system for the first case

C. The 159-node SUT power distribution feeder

As shown in Fig. 5, the last test feeder consists of 159 nodes with 22-kV rating. It describes the power distribution network of Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, THAILAND. The university farm, located at node 22, has installed a small-rating generator of a biomass power generating plant up to 100 kVA capacity. Also, there exists the university energy park equipped with wind-turbine-driven induction generator of a solar tower generating plant located at bus 150. It assumes that each induction generator is operated to serve a 30 kW load equally. However, to experience significant effects of induction generator operation on a practical power distribution system, three sub-cases are situated as follows.

First, the induction generator is installed at bus 22 only. The obtained voltage solutions and their convergences for PQ, admittance (Y) and PV models are shown in Figs 10 – 11.

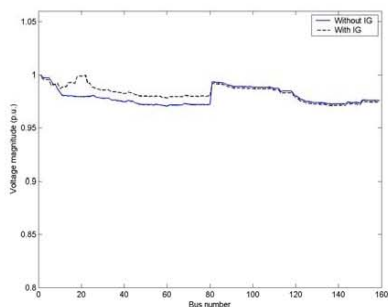


Fig. 10 Voltage solutions of the SUT system for the first case

Second, the induction generator is installed at bus 150 only. The obtained voltage solutions and their convergences for PQ, admittance (Y) and PV models are shown in Figs 12 – 13.

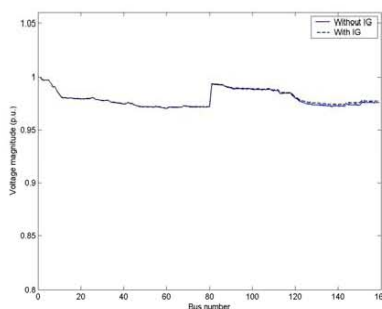


Fig. 12 Voltage solutions of the SUT system for the second case

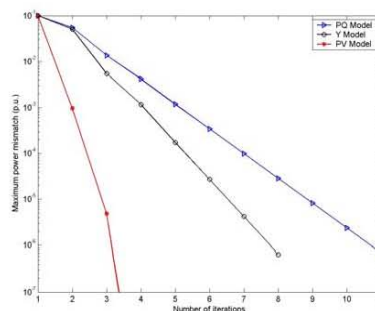


Fig. 13 Solution convergences of the SUT system for the second case

Last, two induction generators are installed at bus 22 and 150 to serve a 30 kW load equally. The obtained voltage solutions and their convergences for PQ , admittance (Y) and PV models are shown in Figs 14 – 15.

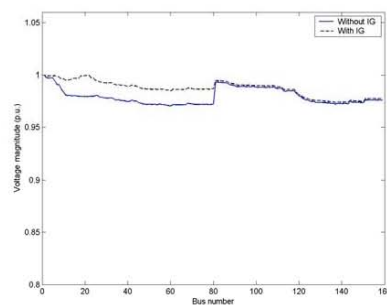


Fig. 14 Voltage solutions of the SUT system for the third case

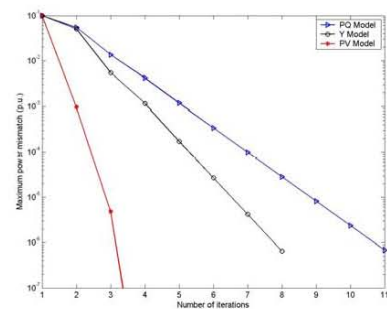


Fig. 15 Solution convergences of the SUT system for the third case

As a result, the solution obtained by using the admittance model converged faster than that of the PQ model for all test cases. In addition, from the SUT test cases, installing the induction generator can improve voltage profiles along the distribution feeder. However, its effect may be less significant if the induction generator is installed close to the farthest node.

V. CONCLUSION

The models proposed in this paper work well with the test case scenarios. The iterative updating process is the most advantage of the proposed models. It is simple to calculate and easy to understand.

To extend the work proposed here voltage instability problems of electric power distribution systems with operation of induction generators can be analysed. Moreover, in this

paper, only self-excited induction generators are employed. The similar concept can contribute a simple technique to characterise doubly-fed induction generators.

REFERENCES

- [1] G. Boyle, *Renewable Energy: Power for Sustainable Future*, Oxford University Press, 2000.
- [2] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac, *Embedded Generation*, The Institute of Electrical Engineers, 2000.
- [3] M. Mardaneh, and G.B. Gharehpetian, "Siting and Sizing of DG Units Using GA and OPF Based Technique", *IEEE Region 10 Conference (TENCON 2004)*, 21 – 24 November 2004, pp. 331 – 334.
- [4] D. Chattopadhyay, K. Bhattacharya, and J. Parikh, "Optimal Reactive Power Planning and Its Spot-Pricing: an Integrated Approach", *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 10, No. 4, 1995, pp. 2014 – 2020.
- [5] R.E. Brown, J. Pan, X. Feng, and K. Koutlev, "Siting Distributed Generation to Defer T&D Expansion", *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 28 October - 2 November 2001, pp. 622 - 627.
- [6] A.E. Feijoo, and J. Cidras, "Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 1, February 2000, pp. 110-115.
- [7] Y. Zhu, and K. Tomsovic, "Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems With Dispersed Generation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 3, 2002, pp. 822-827.
- [8] W. Zhiquan, Z. Shouzhen, and Z. Shuangxi, "Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile", *Automation of Electric Power System*, Vol. 28, No. 16, 2004, pp. 56-60.
- [9] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 2004.
- [10] G.W. Stagg, and A.H. El-Abiad, *Computer methods in power system analysis*, Singapore: McGraw-Hill, 1968.
- [11] Distribution System Subcommittee, "IEEE 37 node test feeder", *IEEE Power Engineering Society*, 1998.
- [12] Distribution system analysis subcommittee, "IEEE 118-node test feeder", *IEEE Power Engineering Society*, 1998.
- [13] H. Chen, J. Chen, D. Shi, and X. Duan, "Multi-stage Dynamic Optimal Power Flow in Wind Power Integrated System", *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, 15-18 August 2005, pp. 1-5.

ประวัติผู้เขียน

นายประมวล แสงสารวัตร เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2523 ที่อำเภอประทาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนประทาย อำเภอประทาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 1 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เมื่อปี พ.ศ. 2548 โดยในระหว่างที่กำลังศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 6 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 (4) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 (5) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 และ (6) ปฏิบัติการพื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานระบบไฟฟ้ากำลัง