แบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า
Model of Power Flow Analysis

นายณัชพล เรืองทรัพย์
นายนาวิน รอดเรือง

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์	แบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า
Title	Model of Power Flow Analysis
ชื่อนักศึกษา	นายณัชพล เรืองทรัพย์ รหัสนักศึกษา 056150403049-6
	นายนาวิน รอดเรือง รหัสนักศึกษา 056150403035-5
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
อาจารย์ ดร.พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร (กรรมการ)	
ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร.พนา ดุสิตากร (กรรมการ)	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ (กรรมการ)	
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ (กรรมการและเลขานุการ)	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ
สถานที่สอบ ณ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ารับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ)
หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์

ชื่อปริญญานิพนธ์ แบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า
ชื่อ สกุล นายณัชพล เรืองทรัพย์
นายนาวิน รอดเรือง
ชื่อปริญญา ปริญญาตรี
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2564
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศทั้งด้านอุตสาหกรรมและการคมนาคมความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นการผลิตไม่เพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ทรัพยากรพลังงานที่มีอยู่ในระบบให้เกิดประโยชน์สูงสุด ระบบที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับข้อผิดพลาดที่อาจเป็นไปได้ ถ้าเกิดเหตุการณ์เพิ่มหรือลดโหลดในระบบอย่างกระทันหันอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผลิตและส่งจ่ายทำได้อย่างไม่เต็มที่ ดังนั้นจึงนำเสนอโครงการนี้เพื่อการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 5 บัส และ 30 บัส โดยใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการปกติ กรณีที่ 2 ตัดวงจรสายส่ง กรณีที่ 3 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จากผลการทดสอบวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังพบว่ากรณีที่ 1 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังมีการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นปกติ ส่วนกรณีที่ 2 ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบไฟฟ้าบางบัสมีค่าลดลงส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนกรณีที่ 3 ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ทำการติดตั้งแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพ

คำสำคัญ : กำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, การไหลของกำลังไฟฟ้า

Thesis title Model of Power Flow Analysis
Author Mr.Natchapol Ruangsap
Mr.Nawin Rodrueang
Degree Bachelor of Electrical Engineering
Major progeam Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Academic Year 2021
Project Advisor Associate Professor Nattachote Rugthaichroencheep, Ph.D.

Abstract

This project presents a power flow analysis model for the purpose of studying power flow in a power system model. At present, electric power is an important factor driving the country both in industry and transportation. The demand for electric power tends to increase, the production is insufficient to meet the demand. Therefore, it is necessary to make the most of the energy resources available in the system. An effective system must be analyzed to detect possible errors. A sudden increase or decrease in load in the system may result in inadequate production and distribution efficiency. Therefore, this project is presented for the analysis of power flow in a 3 bus, 5 bus and 30 bus power system model using a math simulation program. It is divided into 3 case studies: Case 1, power flow under normal conditions, Case 2, transmission line disconnection, Case 3, adding distributed power generation sources.

Keyword : Power, Voltage, Power flow

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์การสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีตามวัตถุประสงค์ได้ เพราะได้รับความกรุณาของอาจารย์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงงานฉบับนี้ ท่านได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวคิดต่าง ๆ และข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และอาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุก ๆท่าน สำหรับคำปรึกษา คำชี้แนะ ตรวจสอบโครงงานทุกขั้นตอน และความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านใน การทำปริญญานิพนธ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โครงการ ส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ซึ่งมอบงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2564 เพื่อจัดทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำโครงงานขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ส่งเสริม สนับสนุน กระตุ้น ตักเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา คุณค่าและประโยชน์ของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอมอบแด่ บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาท ความรู้วิชา อันมีค่ายิ่งแก่ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ และผู้ที่มีส่วนร่วมในการจัดทำปริญญานิพนธ์นี้ทุกท่าน

นายณัชพล เรืองทรัพย์
นายนาวิน รอดเรือง

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 นิยามศัพท์	2
1.7 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง	7
2.4 สมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า	8
2.5 ตัวแปรในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า	8
2.6 ชนิดของบัส	9
2.7 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า	10
2.8 การหาคำตอบของสมการไม่เป็นเชิงเส้น	10
2.8.1 การหาคำตอบด้วยวิธีเก๊าส์	10
2.8.2 การหาคำตอบด้วยวิธีเก๊าส์-ไซเดิล	18
2.8.3 การหาคำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	23
2.9 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า	27
2.10 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	29
2.10.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเก๊าส์-ไซเดิ้ล	29
2.10.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	36
2.11 โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์	51
2.11.1 Power World Program	51
2.11.2 MATLAB Program	52
2.11.3 MATLAB SIMULINK Program	53
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	54
3.1 ผังการผลิตและกรรมวิธีการผลิต	54

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน 55
3.3 การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง 55
3.4 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 55
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการทดสอบ 62
4.1 กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการปกติ 62
4.1.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 62
4.1.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส 64
4.1.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง30 บัส 66
4.2 กรณีปลดวงจรสายส่ง 67
4.2.1 ปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 67
4.2.2 ปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส 69
4.2.3 ปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 25และ27, 6และ28 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส 71
4.3 กรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 73
4.3.1 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 73
4.3.2 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส 75
4.3.3 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส 77
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 79
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 79
5.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 79
5.3 ข้อเสนอแนะ 79
บรรณานุกรม 80
ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ 85

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2-1	ระบบไฟฟ้ากำลัง	8
2-2	ชนิดบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง	9
2-3	วงจรไฟฟ้า 3 ลูป	13
2-4	การลู่เข้าคำตอบของ I1 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน	17
2-5	การลู่เข้าคำตอบของ I2 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน	17
2-6	การลู่เข้าคำตอบของ I3 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน	17
2-7	การลู่เข้าคำตอบของ I1 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล	22
2-8	การลู่เข้าคำตอบของ I2 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล	22
2-9	การลู่เข้าคำตอบของ I3 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล	22
2-10	แนวความคิดสำหรับการหาสูตรประมาณค่าคำตอบด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน	24
2-11	แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส	27
2-12	ทิศทางการไหลของกระแสในระบบไฟฟ้ากำลัง	30
2-13	แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส	31
2-14	ทิศทางและขนาดการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ	35
2-15	ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ในการคำนวณด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน	39
2-16	โปรแกรม Power World	52
2-17	ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม Power World	52
2-18	โปรแกรม MATLAB	53
2-19	ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม MATLAB SIMULINK	53
3-1	ผังการผลิตและกรรมวิธีการผลิต	54
3-2	แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส	56
3-3	แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส	57
3-4	แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส	58
4-1	การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 3 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม Power World	62
4-2	การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK	63
4-3	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ	64
4-4	การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 5 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม Power World	64
4-5	การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 5 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK	65
4-6	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ	66
4-7	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-8	การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ด้วยโปรแกรม Power World	68
4-9	การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK	68
4-10	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัสกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2	69
4-11	การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ด้วยโปรแกรม Power World	70
4-12	การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK	70
4-13	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัสกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5	71
4-14	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส กรณีตัดวงจรสายส่งระหว่างบัส 25 และ 27, 6 และ 28	73
4-15	การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ด้วยโปรแกรม Power World	73
4-16	การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK	74
4-17	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส กรณีติดเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW	75
4-18	การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ด้วยโปรแกรม Power World	75
4-19	การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK	76
4-20	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส กรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW	77
4-21	แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	แผนการดำเนินงานโครงการ	4
2-1	สรุปเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในอดีต	7
2-2	ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละบัส	10
2-3	สมมติค่าเริ่มต้นของกระแส	15
2-4	แทนค่ากระแสในรอบเริ่มต้น เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 1	15
2-5	แทนค่ากระแสของรอบที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 2	16
2-6	แทนค่ากระแสของรอบที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 3	16
2-7	เมื่อดำเนินการรอบต่อไป จนกระทั่งถึงรอบที่ 34	16
2-8	แทนค่ากระแสของรอบที่ 34 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 35	16
2-9	ค่าเริ่มต้นของกระแสต่าง ๆ	20
2-10	แทนค่ากระแสในไอเทอเรชันเริ่มต้น เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 1	20
2-11	แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 2	20
2-12	แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 3	20
2-13	เมื่อดำเนินการไอเทอเรชันต่อไป จนกระทั่งถึงไอเทอเรชันที่ 24	21
2-14	แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 24 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 25	21
3-1	ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส	56
3-2	ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส	56
3-3	ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส	57
3-4	ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส	58
3-5	ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส	59
3-6	ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส	61
4-1	ผลการทดสอบในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส	63
4-2	ผลการทดสอบในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส	65
4-3	ผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 30 บัส ในสภาวะการปกติด้วยโปรแกรม MATLAB	66
4-4	ผลการทดสอบในกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส	69
4-5	ผลการทดสอบกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส	71
4-6	ผลการทดสอบกรณีตัดวงจรสายส่งระหว่างบัส 25 และ 27, 6 และ 28 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ด้วยโปรแกรม MATLAB	72
4-7	ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4-8 ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส 76

4-9 ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ด้วยโปรแกรม MATLAB 77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศทั้งด้านอุตสาหกรรมและการคมนาคม ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นการผลิตไม่เพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ทรัพยากรพลังงานที่มีอยู่ในระบบให้เกิดประโยชน์สูงสุด ระบบที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับข้อผิดพลาดที่อาจเป็นไปได้ [1] ถ้าเกิดเหตุการณ์เพิ่มหรือลดโหลดในระบบอย่างกระทันหันอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผลิตและส่งจ่ายทำได้อย่างไม่เต็มที่ ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะช่วยให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าใช้เพื่อวิเคราะห์การดำเนินงานและการวางแผนระบบไฟฟ้าและออกแบบการขยายระบบไฟฟ้าในอนาคต [2][3] การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า คือ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และ กระแสที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลที่ได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วย ขนาด และ แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในระบบ กระแส และ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบส่งทุกเส้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเปรียบเสมือนเครื่องมือที่สามารถช่วยให้นักวางแผนระบบไฟฟ้ากำลังสามารถตัดสินใจเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดขึ้นภายในระบบควรจะมีการแก้ไขระบบอย่างไรเพื่อให้การผลิตและ การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือในการจ่ายกำลังไฟฟ้าและมีความเสถียรภาพของระบบ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทราบถึงหลักการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เพื่อประมวลผลการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. วิเคราะห์การสูญเสียแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงงาน

1. ศึกษาความเป็นมาและสาเหตุของปัญหา
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. วางแผนปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า

4. ออกแบบวงจรระบบไฟฟ้า

5. เขียนวงจรระบบไฟฟ้าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

6. ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในโปรแกรมและหาข้อบกพร่อง

7. แก้ไขข้อบกพร่อง

8. จัดทำรูปเล่มรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงหลักการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

2. ได้ทราบผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

1.6 นิยามศัพท์

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis) การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และ กระแสที่จุดต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะการทำงานปกติ ผลที่ได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วย ขนาด และ แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในระบบกระแส และ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบทุกเส้น ค่าต่างๆที่ได้ออกมาจากผลการศึกษาจะนำมาพิจารณาถึงค่าต่างๆว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่

บัสสแล็ค (Slack Bus) บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียกว่าสวิงบัส (Swing Bus) หรือบัสอ้างอิง (Reference Bus) บัสชนิดนี้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ มุมคงที่และโดยทั่วไปกำหนดให้เป็นมุมศูนย์โดยใช้บัสนี้เป็นบัสอ้างอิงที่มุมของบัสอื่นทั้งระบบจะมาเทียบกับบัสนี้ บัสดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดใหญ่ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าออกมาตามต้องการได้โดยขนาดแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติบัสที่จะถือเป็นบัสอ้างอิงนี้หมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่ออยู่หรือเป็นระบบไฟฟ้า ขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ พารามิตอร์ที่กำหนดค่าคงที่สำหรับบัสนี้ก็คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้า ส่วน P และ Q ของบัสนี้หาได้จากการศึกษาโหลดโฟล์ว

บัสเครื่องกำเนิด (Generator Bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่หรือเป็นบัสที่มีทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดต่ออยู่ และบัสดังกล่าวสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ได้ถ้าต้องการโดยอาศัย AVR (Automatic Voltage Regulator) ดังนั้นขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสมีค่าคงที่ V กำลังไฟฟ้าบัสจริง P มีค่าคงที่ (ได้มาจากการคำนวณการใช้เชื้อพลิงของระบบต่ำสุด และตั้งให้มีค่าคงที่ตามที่ได้คำนวณออกมา) บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียกว่า PV bus นอกจากนี้บางครั้งกำหนดบัสชนิดนี้ให้มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคงที่ ในกรณีหลังนี้ก็เรียกว่า PQ bus ถ้าบัสเครื่องกำเนิดเป็นชนิด PV bus (บัสที่มี P และ V คงที่) พารามิตอร์ที่ต้องหาค่าจากโหลดโฟล์วก็คือ Q และ มุม ถ้าบัสเครื่องกำเนิดเป็นชนิด PQ bus พารามิตอร์ที่ต้องหาจากโหลดโฟล์วก็คือ V และ มุม

บัสโหลด (Load Bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ซึ่งทราบค่ากำลังไฟฟาจริง P และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q หรือบางครั้งที่เรียกว่า PQ บัส ค่าพารามิตอร์ของบัสที่ต้องการหาจากการศึกษาโหลดโฟล์ว คือขนาดแรงดันไฟฟ้า V และ มุมของแรงดันไฟฟ้า

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเก๊าส์-ไซเดิล (Gauss-Seidel) วิธีการ Gauss-Seidel เป็นกระบวนการที่ทำใหม่ซึ่งเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าโดยประมาณให้กับแรงดันไฟฟ้าบัสที่ไม่รู้จัก การใช้แรงดันบัสโดยประมาณและค่าพลังงานจริง และ ค่าจินตภาพที่ระบุค่าใหม่สำหรับแรงดันไฟฟ้าบัสแต่ละตัวจะถูกคำนวณในตอนท้ายของการทำซ้ำแต่ละครั้ง กระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำจนกระทั่งความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าบัสแต่ละตัวและค่าที่สอดคล้องกันในการทำซ้ำสองครั้งติดต่อกันน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ในการศึกษาการไหลของโหลดเวกเตอร์เริ่มต้นใกล้กับโซลูชันขั้นสุดท้ายสามารถระบุได้อย่างง่ายดายด้วยประสบการณ์ก่อนหน้านี้ เพื่ออธิบายว่าวิธีการ GS ถูกนำไปใช้ในการรับโซลูชันการไหลของโหลดให้สันนิษฐานว่าบัสทั้งหมดนอกเหนือจากบัสหย่อนเป็นบัส PQ จะเห็นได้ในภายหลังว่าวิธีการสามารถนำมาใช้ได้อย่างง่ายดายเพื่อรวมบัส PV เช่นกัน มีการระบุแรงดันไฟฟ้าบัสหย่อน มี (n-1) ค่าเริ่มต้นของแรงดันไฟฟ้าบัส ขนาดและมุมถูกสันนิษฐาน ค่าเหล่านี้จะถูกปรับปรุงผ่านกระบวนการทำซ้ำ

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เทคนิคการวนซ้ำนี้เหนือกว่าเทคนิคที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้คือ Gauss-Seidel วิธีนี้ให้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ดีและถูกต้อง ทางคณิตศาสตร์ ในวิธีนี้เมทริกซ์ Jacobian ถูกสร้างขึ้น ประโยชน์ของการทำเมทริกซ์ Jacobian คือเมทริกซ์นี้ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างขนาดแรงดันไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในมุมแรงดันไฟฟ้า เมทริกซ์ Jacobian คำนวณโดยใช้การประเมินเริ่มต้น จากนั้น จะพบความไม่ตรงกันของค่าจากการคำนวณผ่านค่าเริ่มต้น ความไม่ตรงกันเหล่านี้ใช้เพื่อปรับปรุงเมทริกซ์ Jacobian กระบวนการนี้ถูกทำซ้ำเพื่อให้ได้ความถูกต้องตามที่กำหนด เมทริกซ์จาโคเบียนให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในมุมของแรงดันไฟฟ้าและขนาดของแรงดันไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของกำลังไฟฟ้าจริงและปฏิกิริยา เมทริกซ์จาโคเบียน ดังแสดงในสมการที่ 1.1

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \tag{1.1}$$

1.7 แผนการดำเนินงาน

การวางแผนการดำเนินงาน เป็นการกำหนดระยะเวลาการดำเนินงาน ดังแสดงในตารางที่ 1-1 การเขียนแผนดังกล่าวอาจปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของลักษณะของการดำเนินงานการวางแผนยังช่วยให้สามารถคาดการณ์สิ่งที่เกิดขึ้นในอนาคต และช่วยลดความสูญเสียในขดลวดทองแดง ลดความสูญเสียในแกนตัวนำแม่เหล็ก ที่อาจเกิดขึ้นได้

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานโครงการ

กิจกรรมและขั้นตอนการดำเนินงาน	**ระยะเวลา (มิถุนายน พ.ศ.2564 – กันยายน พ.ศ.2564)**											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	↔	↔										
2. รวบรวมรายละเอียดข้อมูลส่วนต่าง ๆ ของโครงงานทั้งหมด		↔	↔									
3. ออกแบบวงจรระบบไฟฟ้ากำลัง			↔	↔								
4. เขียนวงจรระบบไฟฟ้าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์				↔	↔	↔						
5. ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในโปรแกรมและหาข้อบกพร่อง						↔	↔					
6. แก้ไขข้อบกพร่องและสรุปผล								↔	↔			
7. เรียบเรียงเอกสาร										↔	↔	
8. จัดทำปริญญานิพนธ์											↔	↔

บทที่ 2

ทฤษฎีของงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการศึกษาระบบไฟฟ้าทั่วไปเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาการวางแผนขยายระบบไฟฟ้าและยังสามารถพิจารณาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงแรงดันและตัวประกอบกำลังการไหลของกำลังไฟฟ้าหรือโหลดโฟลว์ (Load Flow) เป็นการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบกำลังไฟฟ้าขณะทำงานในสภาวะปกติ [4][5] โดยวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์การไหลของโหลดคือเพื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้า มุมแรงดัน กำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของบัสทั้งหมดในเครือข่าย [6] ซึ่งการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟาจะชี้ให้เห็นปญหาที่อาจเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังและสายส่งไฟฟ้า

2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

Mehmet Kurban, Ummuhan Basaran Filik, (2006). [3] เอกสารนี้นำเสนอภาพรวมทั่วไปทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อถึงกันในตุรกี ซึ่งประกอบด้วยบัส 30 บัส และ 35 บัส รวม 65 บัสที่เชื่อมต่อกันด้วยสายส่งไฟฟ้าขนาด 380 กิโลโวลต์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์กระแสไฟที่ดำเนินการโดยใช้ MATLAB ยังทำขึ้นเพื่อค้นหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สุดของระบบและเพื่อวางแผนการสร้างระบบไฟฟ้า ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้นำมาจาก TEIAS (ผู้ควบคุมระบบส่งกำลังของตุรกี) และ EUAS (บริษัทผลิตไฟฟ้า จำกัด)

Huang Xinbo, Cheng Ronggui, (2008). [7] เทคโนโลยีการเพิ่มความจุแบบไดนามิกออนไลน์ของสายส่งได้รับการออกแบบโดยผู้เขียนเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งของสายส่งโดยไม่ละเมิดกฎที่มีอยู่ มีการสร้างสูตรการวิ่งชั่วคราวของสายส่ง ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิที่อนุญาตของตัวนำและความหลากหลายของช่วงลดลง และวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์สภาพแวดล้อมต่อความสามารถในการส่งของสาย เช่น อุณหภูมิแวดล้อม ลม ความเร็ว ความเข้มของแสงแดด ฯลฯ

Gang Qu, Haozhong Cheng, Liangzhong Yao, Zeliang Ma, Zhonglie Zhu, Xiaohui Wang, Jianzhong Lu, (2008). [8] มีการนำเสนอแบบจำลองการวางแผนการขยายระบบส่งกำลังแบบใหม่และอัลกอริธึมแอปพลิเคชันซึ่งพิจารณาถึงความจุส่วนเกินในการส่งและปัจจัยโหลดของสายส่ง ในการวางแผนการขยายระบบส่งกำลังแบบเดิม สายส่งบางสายจะทำงานที่ค่าโหลดแฟกเตอร์สูง เนื่องจากไม่สนใจระดับโหลดของสายส่ง ซึ่งอาจนำไปสู่ความแออัดในเครือข่ายและลดความยืดหยุ่นในการจัดส่ง กระบวนการวางแผนดังกล่าวให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพการลงทุนมากกว่าด้านอื่นๆ เอกสารนี้อธิบายวัตถุประสงค์ใหม่ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้การกระจายปัจจัยภาระสาขาที่ดีที่สุดพร้อมกับลดการลงทุนให้น้อยที่สุดพร้อมกัน Chaos Optimal Algorithm (COA) ถูกนำมาใช้และใช้เพื่อแก้ปัญหาการวางแผนการขยายการส่งสัญญาณเนื่องจากลักษณะสุ่มและตามหลักสรีรศาสตร์ ประสิทธิภาพของแบบจำลองและวิธีการที่นำเสนอนั้นได้รับการทดสอบในสองระบบทั่วไป

P. S. Bhowmik, S. P. Bose, D. V. Rajan, S. Deb, (2011). [6] การคำนวณกระแสโหลดเป็นปัญหาการดำเนินการและการวางแผนระบบไฟฟ้าขั้นพื้นฐานที่สุด ในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ แนะนำให้ใช้วิธีแรงดันโหนดของโซลูชันเครือข่ายโดยใช้เมทริกซ์การรับเข้า เพื่อที่จะศึกษาอัลกอริธึมคู่ขนาน ซึ่งปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน การปรับปรุงการควบคุมแบบเรียลไทม์ และการสนับสนุนการตัดสินใจในเวลาที่เหมาะสม ได้มีการเสนอวิธีการไหลของโหลดที่ได้รับการปรับปรุงตามทฤษฎีการรบกวน วิธีการใหม่ที่เสนอนี้ได้รับการทดสอบกับระบบ IEEE 5-bus, IEEE 14-bus, IEEE 30-bus และ IEEE 118-bus ผลลัพธ์เชิงตัวเลขแสดงประสิทธิภาพและประสิทธิภาพเหนือวิธี Gauss-Seidal แบบเดิม

Raheel Muzzammel, Muhammad Ahsan, Waqas Ahmad, (2015). [10] การวิเคราะห์การไหลของกำลังหรือการวิเคราะห์การไหลของโหลดเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลของพลังงานไฟฟ้าในระบบที่เชื่อมต่อถึงกัน เป้าหมายของการวิเคราะห์นี้คือเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ของมุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าสำหรับบัสแต่ละบัสในระบบไฟฟ้าสำหรับโหลดที่ระบุและสภาวะของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อได้ข้อมูลที่ต้องการแล้ว จะสามารถวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟในแต่ละสาขา ตลอดจนเอาต์พุตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ เนื่องจากปัญหาไม่เชิงเส้นจึงใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อให้ได้วิธีแก้ปัญหาภายในพิกัดความเผื่อที่ยอมรับได้ ในบทความนี้ เราจะเปรียบเทียบวิธี Gauss-Seidel, Newton-Raphson และ Fast-Decoupled โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพ อัตราการลู่เข้า และเอาต์พุตสำหรับระบบบัส IEEE 14 นอกจากนี้ ตัวควบคุมข้อเท็จจริงเช่น ตัวชดเชย VAR แบบคงที่สำหรับการปรับปรุงในโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้ายังได้รับการออกแบบและใช้งาน และการเปรียบเทียบจะถูกวาดระหว่างโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าที่มีหรือไม่มีตัวควบคุมข้อเท็จจริง

Sho Kainose, Ken Nagasaka, (2015). [11] การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างแบบจำลองสมาร์ทกริดขนาดใหญ่บน MATLAB/Simulink สมาร์ทกริดคือเครือข่ายพลังงานยุคหน้าซึ่งนำเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาสู่ระบบไฟฟ้า ในห้องปฏิบัติการของเรา แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังตาม IEEE 30 Bus Test System ถูกสร้างขึ้นบน MATLAB/Simulink ในอดีต ในการศึกษานี้ เรามุ่งเน้นที่การสร้างแบบจำลองรูปแบบระบบสื่อสารที่เหมาะสมร่วมกับแบบจำลองระบบไฟฟ้า IEEE 30 Bus บน MATLAB/SIMULINK โมเดลการสื่อสารนี้สามารถสร้างอิทธิพลซึ่งมักจะเกิดขึ้นในการสื่อสาร เช่น เสียงรบกวน ความล่าช้า ความผันผวนของเวลาที่มาถึงของแพ็กเก็ต และการสูญเสียแพ็กเก็ต ในการสร้างแบบจำลอง มีการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเพื่อป้องกันการลดลงของความเร็วการจำลอง ในที่สุดก็พยายามรวมบล็อกการสื่อสารไว้ในรุ่นระบบกำลังบัส 30 ตัว

M. Venkateswara Reddy, Bishnu Prasad Muni, A.V.R.S. Sarma, (2016). [9] บทความนี้กล่าวถึงการออกแบบและการจำลองระบบบัสมาตรฐาน IEEE 14 กับ IPFC เป็นวิธีแก้ปัญหาที่แนะนำสำหรับการแบ่งปันโหลดอย่างมีประสิทธิภาพระหว่างสายส่ง ตัวควบคุมการไหลของพลังงานระหว่างสายจะถ่ายโอนความต้องการพลังงานจากสายโหลดด้านบนไปยังสายส่งที่โหลดน้อยกว่า IPFC ที่เสนอเชื่อมต่อระหว่าง 2, 3 และ 3, 4 บัสของระบบบัส IEEE 14 มาตรฐาน ในบทความนี้ ได้มีการนำเสนอ IPFC ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ห้าระดับสองระดับที่เชื่อมต่อกับระบบ IEEE หลัก ระบบได้รับการออกแบบใน MATLAB/SIMULINK และอธิบายประสิทธิภาพของการส่งกำลังที่มีและไม่มี IPFC

Enes Cengiz, Cemal Yılmaz, Ercan Nurcan Yılmaz, Hamdi Tolga Kahraman, (2019). [1] ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้สำหรับทุกคน เครื่องมือทางเทคโนโลยีจำนวนมากที่พัฒนาขึ้นนั้นใช้พลังงานจากไฟฟ้า สิ่งสำคัญคือต้องส่งมอบพลังงานไฟฟ้าให้กับลูกค้าอย่างต่อเนื่องและมีคุณภาพสูง สำหรับพลังงานที่ไม่ขาดตอน จำเป็นต้องมีโครงสร้างพื้นฐานที่เหมาะสมและการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง การออกแบบที่ไม่ถูกต้องในระหว่างขั้นตอนการติดตั้งจะส่งผลให้เกิดการทำงานผิดพลาดซึ่งแก้ไขได้ยากหลังการติดตั้ง การผลิตและการจ่ายไฟฟ้าควรเกิดขึ้นด้วยต้นทุนที่ต่ำแต่มีประสิทธิภาพสูงสุด การไหลของพลังงานที่เหมาะสม (OPF) ในระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำงานที่เชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพของเครือข่ายไฟฟ้า OPF ซึ่งเป็นเครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพพื้นฐานในด้านการปฏิบัติงานและการวางแผน มีบทบาทสำคัญในระบบไฟฟ้า OPF พยายามลดทั้งการสูญเสียพลังงานจากการกระจายและต้นทุนของพลังงานที่ดึงออกจากสถานีย่อยโดยไม่กระทบต่อการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่คาดหวังสำหรับการวิเคราะห์การไหลของโหลด ได้แก่ ขนาดแรงดันไฟฟ้า มุมเฟส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในการศึกษานี้ ได้มีการออกแบบแบบจำลองการไหลของพลังงานของระบบไฟฟ้าตามข้อมูลจริงของ 8 บัสบาร์ของจังหวัดอิซมีร์ มีการใช้สถานการณ์ต่างๆ เพื่อการวิเคราะห์ระบบที่แม่นยำ

Jirasak Laowanitwattana, Sermsak Uatrongjit, (2020). [2] การวิเคราะห์กระแสความน่าจะเป็น (PPF) มักใช้ในการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอนต่อประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า บทความนี้นำเสนอเทคนิคในการปรับปรุงเทคนิคการวิเคราะห์ PPF ที่ใช้การขยายตัวของพหุนามแบบพหุนาม (aPCE) เมื่อนำไปใช้กับระบบที่มีพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอนจำนวนมาก วิธีการที่เสนอนี้แสดงถึงการตอบสนองของระบบไฟฟ้าเป็นการประมาณระดับต่ำ (LRA) นอกจากนี้ มีการใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอนและยังลดความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านั้นด้วย การรวมกันนี้ช่วยให้วิธีการที่เสนอดำเนินการ PPF ของระบบไฟฟ้าที่มีพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอนจำนวนมาก จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขเบื้องต้นในระบบ IEEE 57-bus ที่แก้ไข จะสังเกตได้ว่าวิธีการแก้ไขที่เสนอสามารถค้นหาลักษณะทางสถิติที่แม่นยำของการตอบสนอง แต่ใช้เวลาคำนวณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ PPF ที่ใช้ MCS

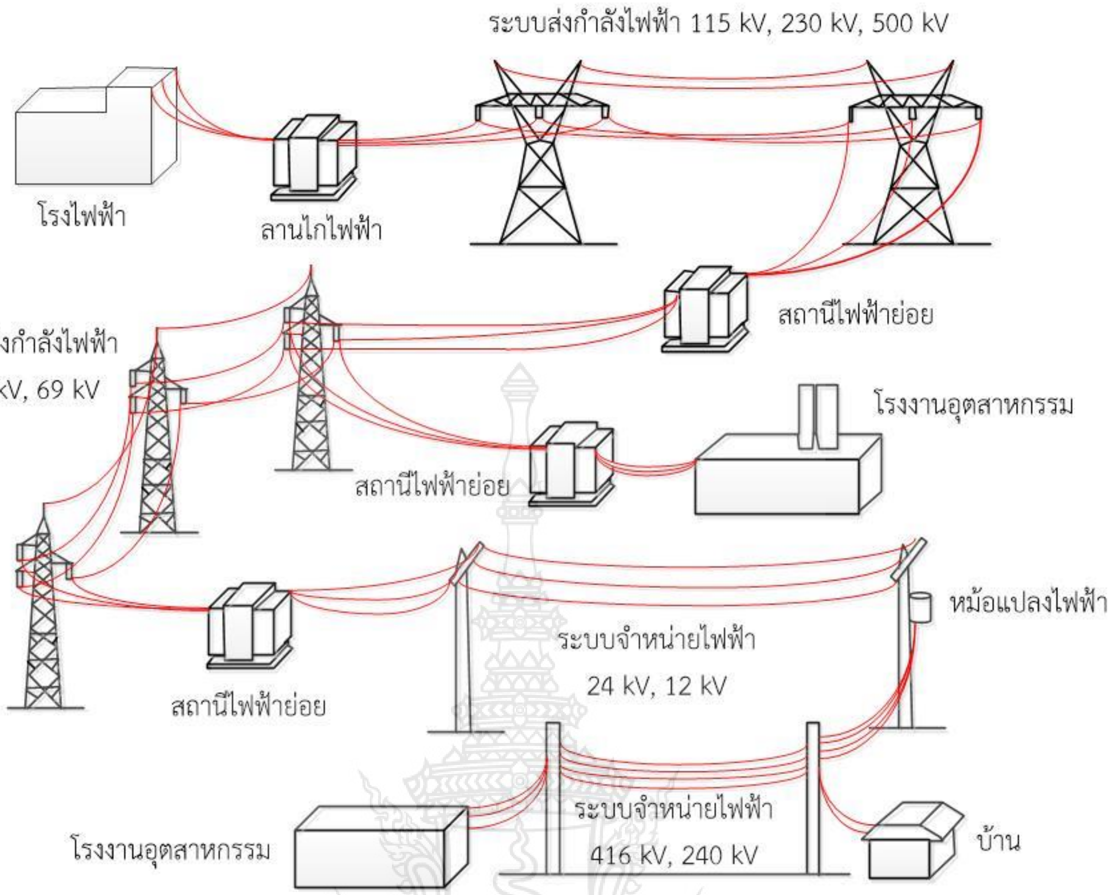
สรุปเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในอดีต ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สรุปเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในอดีต

ปี	เทคนิคที่ใช้
2006	MATLAB
2015	เปรียบเทียบวิธี Gauss-Seidel, Newton-Raphson และ Fast-Decoupled
2015	MATLAB/SIMULINK
2020	เทคนิคในการปรับปรุงเทคนิคการวิเคราะห์ PPF ที่ใช้การขยายตัวของพหุนามแบบพหุนาม (aPCE)

2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้า(Generation System) ระบบส่งกำลังไฟฟ้า(Transmission System)และระบบจำหน่าย(Distribution System) ดังแสดงในรูปที่ 2-1 [4]



รูปที่ 2-1 ระบบไฟฟ้ากำลัง

2.4 สมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

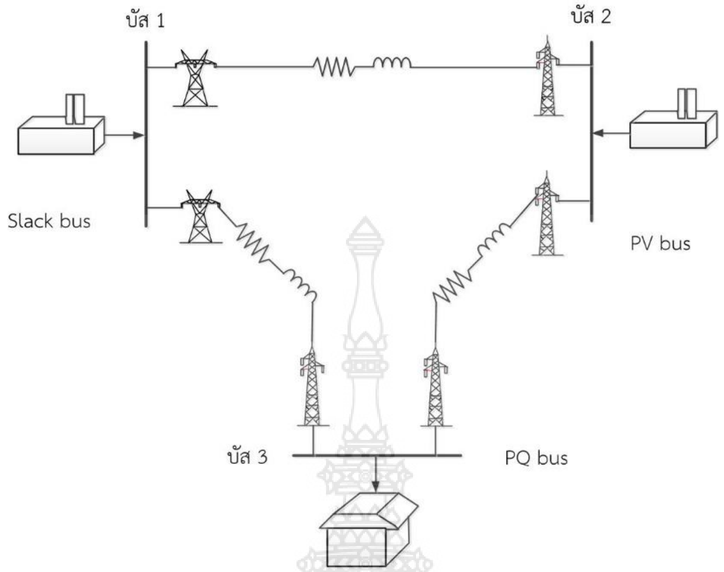
ในปัจจุบันด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของเศรษฐกิจ การคมนาคม ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความจุในการส่งถูกจำกัดด้วยความร้อนของสายส่ง [7] สายส่งไฟฟ้าจะมีความจุที่กำหนดถ้าในระบบไฟฟ้ามีการเพิ่มโหลด ลดโหลดจะส่งผลให้ระบบมีสายส่งบางเส้นที่ทำงานด้วยปัจจัยโหลดสูงซึ่งในความเป็นจริงจากมุมมองของการรักษาความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือในการทำงานของระบบสายส่งจำเป็นต้องรักษาขอบความจุเพื่อให้สามารถทำงานที่ปัจจัยโหลดต่ำเพื่อรักษาความยืดหยุ่นเพียงพอในกรณีฉุกเฉิน เพื่อให้มั่นใจถึงสภาวะด้านความปลอดภัย ผู้จ่ายไฟจะปรับสายปัจจัยโหลดสูงเพื่อปรับสมดุลการทำงานของระบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ [8]

2.5 ตัวแปรในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

1. ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P)
2. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q)
3. ค่าขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)
4. ค่ามุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (δ) [4]

2.6 ชนิดของบัส

ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ชนิดบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

1. บัสสแล็ค (Slack Bus) บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียกว่าสวิงบัส (Swing Bus) หรือบัสอ้างอิง (Reference Bus) บัสชนิดนี้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ มุมคงที่และโดยทั่วไปกำหนดให้เป็นมุมศูนย์โดยใช้บัสนี้เป็นบัสอ้างอิงที่มุมของบัสอื่นทั้งระบบจะมาเทียบกับบัสนี้ บัสดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดใหญ่ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าออกมาตามต้องการได้โดยขนาดแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติบัสที่จะถือเป็นบัสอ้างอิงนี้หมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่ออยู่หรือเป็นระบบไฟฟ้า ขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ พารามิตอร์ที่กำหนดค่าคงที่สำหรับบัสนี้ก็คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้า ส่วน P และ Q ของบัสนี้หาได้จากการศึกษาโหลดโฟล์ว

2. บัสเครื่องกำเนิด (Generator Bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่หรือเป็นบัสที่มีทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดต่ออยู่ และบัสดังกล่าวสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ได้ถ้าต้องการโดยอาศัย AVR (Automatic Voltage Regulator) ดังนั้นขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสมีค่าคงที่ V กำลังไฟฟ้าบัสจริง P มีค่าคงที่ (ได้มาจากการคำนวณการใช้เชื้อพลิงของระบบต่ำสุด และตั้งให้มีค่าคงที่ตามที่ได้คำนวณออกมา) บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียกว่า PV bus นอกจากนี้บางครั้งกำหนดบัสชนิดนี้ให้มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคงที่ ในกรณีหลังนี้ก็เรียกว่า PQ bus ถ้าบัสเครื่องกำเนิดเป็นชนิด PV bus (บัสที่มี P และ V คงที่) พารามิตอร์ที่ต้องหาค่าจากโหลดโฟล์วก็คือ Q และ มุม ถ้าบัสเครื่องกำเนิดเป็นชนิด PQ bus พารามิตอร์ที่ต้องหาจากโหลดโฟล์วก็คือ V และ มุม

3. บัสโหลด (Load Bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ซึ่งทราบค่ากำลังไฟฟาจริง P และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q หรือบางครั้งที่เรียกว่า PQ บัส ค่าพารามิตอร์ของบัสที่ต้องการหาจากการศึกษาโหลดโฟล์ว คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า V และ มุมของแรงดันไฟฟ้าสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ของแต่ละบัสได้ดังตารางที่ 2-1 [4][5]

ตารางที่ 2-2 ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละบัส [9]

บัส	ปริมาณที่ทราบค่า	ปริมาณที่ไม่ทราบค่า
Reference Bus	$\|V\|,\delta$	P,Q
PV Bus	$P,\|V\|$	Q,δ
PQ Bus	P,Q	$\|V\|,\delta$

2.7 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบมีบทบาทสำคัญอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้รับการออกแบบเพื่อทำงานภายในค่าช่วงแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ถ้าอุปกรณ์ถูกจ่ายโดยแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าช่วงของมันอายุการใช้งานของอุปกรณ์จะสั้นลงจากแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่กำหนดโดย IEC ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่อนุญาตให้กับลูกค้าคือ ±5% จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด (0.95 - 1.05) ในระบบไฟฟ้าสามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้ [9]

1. โดยการฉีดกำลังรีแอกทีฟ (ตัวเก็บประจุแบบแบ่งสถิตและเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยตัวเก็บประจุแบบคงที่หรือซิงโครนัสตัวชดเชย
2. เปลี่ยนแทปหม้อแปลง
3. ใช้อุปกรณ์ Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS)
4. โดยการแลกเปลี่ยนอำนาจระหว่างสาย (IPFC)

2.8 การหาคำตอบของสมการไม่เป็นเชิงเส้น

2.8.1 การหาคำตอบด้วยวิธีเก๊าส์

วิธีการคำนวณแบบวนรอบด้วยวิธีเก๊าส์ (Gauss Iterative Technique) เป็นวิธีการวนซ้ำจะมีการสันนิษฐานวิธีแก้ปัญหาของชุดสมการไม่เชิงเส้นที่กำหนดกระบวนการวนซ้ำจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งคำตอบของสมการตรงกับความแม่นยำที่กำหนดวิธีนี้เป็นการลองผิดลองถูกซึ่งได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำพอสมควรขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้ [5][10]

1. ให้สมมุติ หรือเดาค่าเริ่มต้นค่าแรก
2. ค่าสมมุตินี้ให้แทนค่าลงในสมการดั้งเดิม เพื่อการคำนวณค่าใหม่
3. การประมาณค่าครั้งที่สอง ถูกใช้ต่อไปในการประมาณค่าครั้งที่สี่
4. ขั้นตอนของการคำนวณก็จะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้รับคำตอบ

จากการที่มีสมการเชิงเส้นอยู่ n สมการ และมีตัวไม่ทราบค่า (Unknown) อยู่ n ค่า คือ $x_1,x_2,x_3,\ldots,x_n$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์คือ a (Coefficients) และมีค่าของตัวแปรไม่เป็นอิสระ (Dependent Variables) คือ Y เป็นตัวแปรทราบค่า

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \ldots + a_{1n}x_n = y_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \ldots + a_{2n}x_n = y_2 \qquad (2.8.1)$$

$$\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots$$

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \ldots + a_{nn}x_n = y_n$$

จากสมการที่ (2.8.1) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$x_1 = \frac{1}{a_{11}}\left(y_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3 \ldots - a_{1n}x_n\right)$$

$$x_2 = \frac{1}{a_{22}}\left(y_2 - a_{21}x_1 - a_{23}x_3 \ldots - a_{2n}x_n\right) \qquad (2.8.2)$$

$$\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots$$

$$x_n = \frac{1}{a_{nn}}\left(y_n - a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 \ldots - a_{n,n-1}x_{n-1}\right)$$

ให้สมมุติค่าเริ่มแรกคือ ($x_1^{(0)},x_2^{(0)},\ldots,x_n^{(0)}$) โดยที่ (0) จะชี้ค่าเริ่มต้นของตัวแปรโดยทั่วไปค่าเริ่มต้นที่นำมาใช้คือ

$$x_1^{(0)} = y_1 / a_{11}, x_2^{(0)} = y_2 / a_{22}, \ldots, x_n^{(0)} = y_n / a_{nn}$$

การเริ่มต้นโดยประมาณของการแก้สมการให้แทนค่าลงไปในสมการที่ (2.2) นั่นคือ

$$x_1^{(1)} = \frac{1}{a_{11}}\left(y_1 - a_{12}x_2^{(0)} - a_{13}x_3^{(0)} \ldots - a_{1n}x_n^{(0)}\right)$$

$$x_1^{(1)} = \frac{1}{a_{11}}\left(y_1 - a_{21}x_1^{(0)} - a_{23}x_3^{(0)} \ldots - a_{2n}x_n^{(0)}\right) \qquad (2.8.3)$$

$$\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots$$

$$x_n^{(1)} = \frac{1}{a_{nn}}\left(y_n - a_{n1}x_1^{(0)} - a_{n2}x_2^{(0)} \ldots - a_{n,n-1}x_{n-1}^{(0)}\right)$$

จากสมการที่ (2.8.3) จะได้ค่าผลลัพธ์โดยประมาณ

$$x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \ldots, x_n^{(1)}$$

ค่าเหล่านี้จะนำไปแทนในการคำนวณรอบต่อไปโดยทั่วไปสำหรับในการคำนวณรอบที่ต่อไปดังนั้น สามารถเขียนสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$x_1^{(k)} = \frac{1}{a_{11}}\left(y_1 - a_{12}x_2^{(k-1)} - a_{13}x_3^{(k-1)} \ldots - a_{1n}x_n^{(k-1)}\right)$$

$$x_1^{(k)} = \frac{1}{a_{22}}\left(y_2 - a_{21}x_1^{(k-1)} - a_{23}x_3^{(k-1)} \ldots - a_{2n}x_n^{(k-1)}\right)$$

(2.8.4)

$$\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots$$

$$x_n^{(k)} = \frac{1}{a_{nn}}\left(y_n - a_{n1}x_1^{(k-1)} - a_{n2}x_2^{(k-1)} \ldots - a_{n,n-1}x_{n-1}^{(k-1)}\right)$$

ถ้าต้องการเขียนสมการให้สั้นแต่มีความเหมือนเดิมก็สามารถเขียนได้ คือ

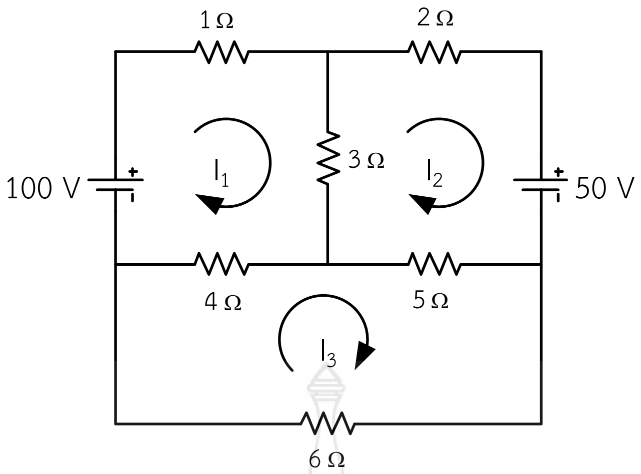
$$x^k = Fg\left[x^{(k-1)}\right] \tag{2.8.5}$$

กระบวนการคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์นั้นทำได้เมื่อค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณในแต่ละรอบ มีค่าแตกต่างกันน้อยมากหรือน้อยกว่าค่าของโดยที่ค่านั้นมีค่า คือ

$$\left|x^{(k)}\right| - \left|x^{(k-1)}\right| = e$$

โดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังนั้นผลลัพธ์สามารถที่จะคำนวณหาได้และ การเข้าใกล้คำตอบนั้นจะเร็วและดีขึ้นถ้าสัมประสิทธิ์บนเส้นทแยงมุม (Diagonal Co-efficient : a_{ij}) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์บนเส้นทแยงมุม (a_{ij}) โดยที่ $i \neq j$

ตัวอย่างที่ 2.1 จากวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 2-3 ให้เขียนสมการแรงดันและแก้ปัญหาของวงจรเพื่อหาค่ากระแส I1, I2 และ I3 โดยวิธีการของเก๊าส์ไอเทอเรชัน กำหนด 20 รอบ โดยผลต่างดัชนีต้องต่ำกว่า 0.01



รูปที่ 2-3 วงจรไฟฟ้า 3 ลูป

วิธีทำ ใช้วิธีการตรวจพินิจเพื่อเขียนสมการแรงดันได้ดังนี้

ลูปที่ 1 : $8I_1 - 3I_2 - 4I_3 = 100$

ลูปที่ 2 : $-3I_1 + 10I_2 - 5I_3 = -50$

ลูปที่ 3 : $-4I_1 - 5I_2 + 15I_3 = 0$

เขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบของผลต่าง คือ

$$I_1 = \frac{1}{8}\left(100 + 3I_2 + 4I_3\right)$$

$$I_2 = \frac{1}{10}\left(-50 + 3I_1 + 5I_3\right)$$

$$I_3 = \frac{1}{15}\left(0 + 4I_1 + 5I_2\right)$$

สมมติค่าเริ่มต้นของกระแสคือ

$$I_1^{(0)} = \frac{100}{8} = 12.5$$

$$I_2^{(0)} = \frac{-50}{10} = -5$$

$$I_3^{(0)} = \frac{0}{15} = 0$$

แทนค่ากระแสในรอบเริ่มต้น เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 1

$$I_1^{(1)} = \frac{1}{8}\left[100 + (3)(-5) + (4)(0)\right] = 10.625$$

$$I_2^{(1)} = \frac{1}{10}\left[-50+\left(3\right)\left(12.5\right)+(5)\left(0\right)\right] = -1.25$$

$$I_3^{(1)} = \frac{1}{15}\left[0+\left(4\right)\left(12.5\right)+(5)(-5)\right] = 1.667$$

แทนค่ากระแสของรอบที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 2

$$I_1^{(2)} = \frac{1}{8}\left[100+\left(3\right)\left(-1.25\right)+(4)\left(1.667\right)\right] = 12.865$$

$$I_2^{(2)} = \frac{1}{10}\left[-50+\left(3\right)\left(10.625\right)+(5)\left(1.667\right)\right] = -0.979$$

$$I_3^{(2)} = \frac{1}{15}\left[0+\left(4\right)\left(10.625\right)+(5)(-1.25)\right] = 2.417$$

แทนค่ากระแสของรอบที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 3

$$I_1^{(3)} = \frac{1}{8}\left[100+\left(3\right)\left(-0.979\right)+(4)\left(2.417\right)\right] = 13.341$$

$$I_2^{(3)} = \frac{1}{10}\left[-50+\left(3\right)\left(12.865\right)+(5)\left(2.417\right)\right] = 0.068$$

$$I_3^{(3)} = \frac{1}{15}\left[0+\left(4\right)\left(12.865\right)+(5)(-0.979)\right] = 3.104$$

เมื่อดำเนินการรอบต่อไป จนกระทั่งถึงรอบที่ 19 จะมีค่ากระแส ดังนี้

$$I_1^{(19)} = \frac{1}{8}\left[100+\left(3\right)\left(2.192\right)+(4)\left(4.931\right)\right] = 15.788$$

$$I_2^{(19)} = \frac{1}{10}\left[-50+\left(3\right)\left(15.779\right)+(5)\left(4.931\right)\right] = 2.199$$

$$I_3^{(19)} = \frac{1}{15}\left[0+\left(4\right)\left(15.779\right)+(5)(2.192)\right] = 4.938$$

แทนค่ากระแสของรอบที่ 19 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 20

$$I_1^{(20)} = \frac{1}{8}\left[100+\left(3\right)\left(2.199\right)+(4)\left(4.938\right)\right] = 15.794$$

$$I_2^{(20)} = \frac{1}{10}\left[-50+\left(3\right)\left(15.788\right)+(5)\left(4.938\right)\right] = 2.205$$

$$I_3^{(20)} = \frac{1}{15}\left[0+\left(4\right)\left(15.788\right)+(5)(2.199)\right] = 4.943$$

สำหรับผลต่างของกระแส (ΔI) ระหว่างรอบที่ 20 และรอบที่ 19 คือ

$$\Delta I_1 = 15.794 - 15.788 = 0.006$$

$$\Delta I_2 = 2.205 - 2.199 = 0.006$$

$$\Delta I_3 = 4.943 - 4.938 = 0.005$$

การลู่เข้าของคำตอบจะสำเร็จได้เมื่อ ΔI มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีที่กำหนด เช่น $\Delta I < 0.01$ ดังนั้นการแก้ปัญหาในการวนรอบเพื่อหาค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 จะมีการลู่เข้าหาคำตอบประมาณ

รอบที่ 20 ผลของการคำนวณค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 มีค่า ดังนี้

$$I_1 = 15.794 \text{ A}$$

$$I_2 = 2.205 \text{ A}$$

$$I_3 = 4.943 \text{ A}$$

การหาคำตอบวิธีการของเก๊าส์ไอเทอเรชันด้วยโปรแกรม Excel กำหนด 40 รอบ โดยผลต่างดัชนีต้องต่ำกว่า 0.01

วิธีทำ ใช้วิธีการตรวจพินิจเพื่อเขียนสมการแรงดันได้ดังนี้

ลูปที่ 1 : $8I_1 - 3I_2 - 4I_3 = 100$

ลูปที่ 2 : $-3I_1 + 10I_2 - 5I_3 = -50$

ลูปที่ 3 : $-4I_1 - 5I_2 + 15I_3 = 0$

เขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบของผลต่าง คือ

$$I_1 = \frac{1}{8}\left(100 + 3I_2 + 4I_3\right)$$

$$I_2 = \frac{1}{10}\left(-50 + 3I_1 + 5I_3\right)$$

$$I_3 = \frac{1}{15}\left(0 + 4I_1 + 5I_2\right)$$

ตารางที่ 2-3 สมมติค่าเริ่มต้นของกระแส

I_1	12.5
I_2	-5
I_3	0

ตารางที่ 2-4 แทนค่ากระแสในรอบเริ่มต้น เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 1

สมการ	1/8	(100	+ 3	I_2	+ 4	I_3)	ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	-5	4	0	10.6250	-1.8750
สมการ	1/10	(-50	+ 3	I_1	+ 5	I_3)	ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_2	0.1	-50	3	12.5	5	0	-1.2500	3.75000
สมการ	1/15	(0	+ 4	I_1	+ 5	I_2)	ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_3	0.0667	0	4	12.5	5	-5	1.66667	1.66667

ตารางที่ 2-5 แทนค่ากระแสของรอบที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 2

Iter 2							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	-1.25	4	1.66667	12.86458	2.23958
I_2	0.1	-50	3	10.625	5	1.66667	-0.97917	0.27083
I_3	0.0667	0	4	10.625	5	-1.25	2.41667	0.75000

ตารางที่ 2-6 แทนค่ากระแสของรอบที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 3

Iter 3							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	-0.9792	4	2.41667	13.34115	0.47656
I_2	0.1	-50	3	12.8646	5	2.41667	0.06771	1.04688
I_3	0.0667	0	4	12.8646	5	-0.9792	3.10417	0.68750

ตารางที่ 2-7 เมื่อดำเนินการรอบต่อไป จนกระทั่งถึงรอบที่ 34 จะมีค่ากระแส ดังนี้

Iter 34							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	2.22196	4	4.95704	15.81176	0.00007
I_2	0.1	-50	3	15.8117	5	4.95704	2.22203	0.00007
I_3	0.0667	0	4	15.8117	5	2.22196	4.95710	0.00006

ตารางที่ 2-8 แทนค่ากระแสของรอบที่ 34 เพื่อหาค่ากระแสในรอบที่ 35

Iter 35							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	2.22203	4	4.95710	15.81181	0.00005
I_2	0.1	-50	3	15.8118	5	4.95710	2.22208	0.00005
I_3	0.0667	0	4	15.8118	5	2.22203	4.95714	0.00004

สำหรับผลต่างของกระแส (ΔI) ระหว่างรอบที่ 35 และรอบที่ 34 คือ

$$\Delta I_1 = 0.00005$$

$$\Delta I_2 = 0.00005$$

$$\Delta I_3 = 0.00004$$

การลู่เข้าของคำตอบจะสำเร็จได้เมื่อ ΔI มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีที่กำหนด เช่น $\Delta I < 0.01$ ดังนั้นการแก้ปัญหาในการวนรอบเพื่อหาค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 จะมีการลู่เข้าหาคำตอบประมาณ

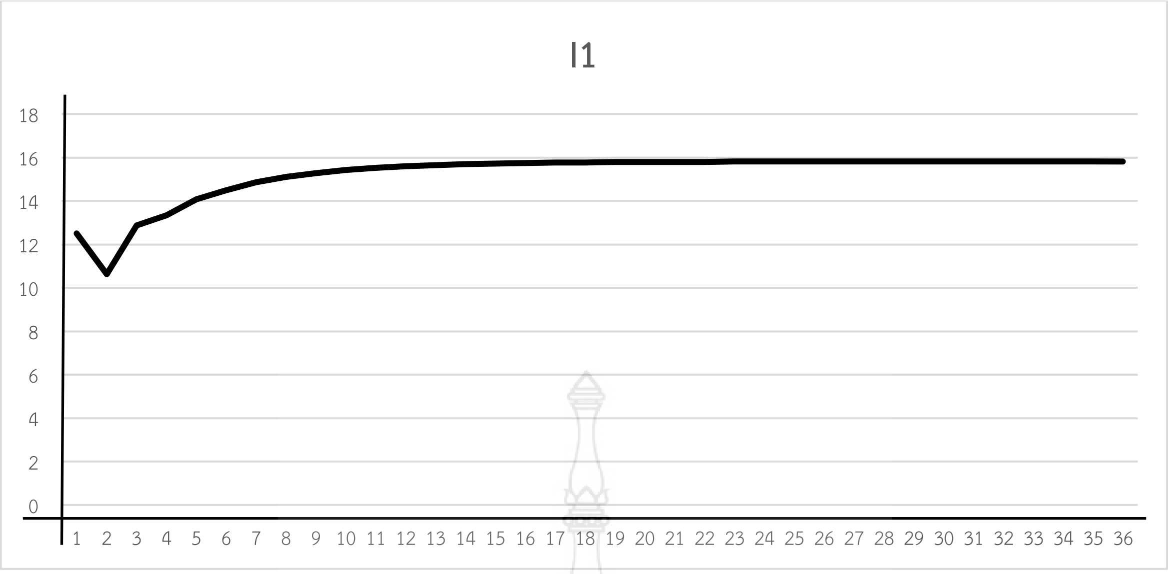
รอบที่ 35 ผลของการคำนวณค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 มีค่า ดังนี้

$$I_1 = 15.81181 \text{ A}$$

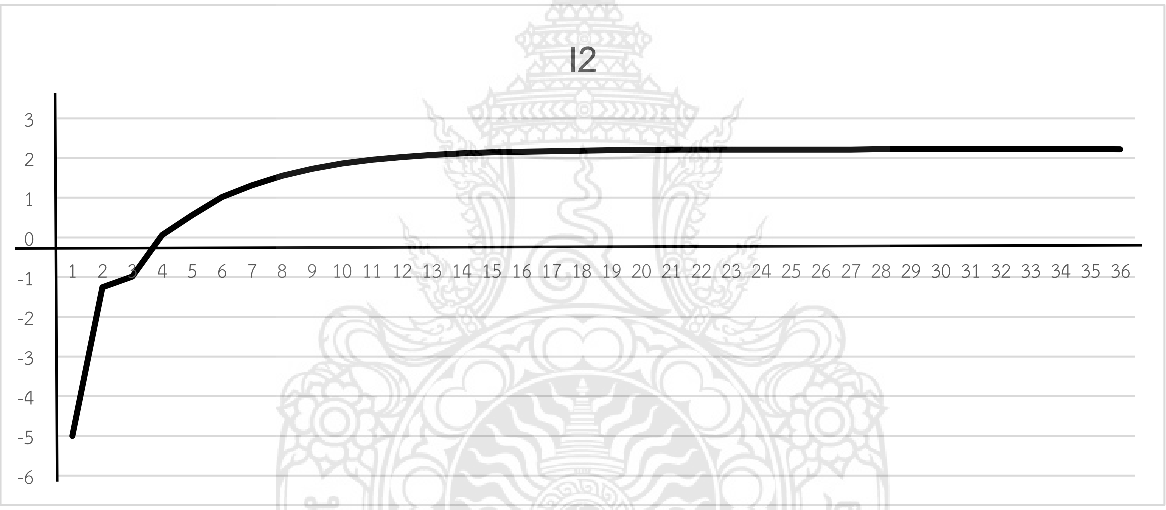
$$I_2 = 2.22208 \text{ A}$$

$$I_3 = 4.95714 \text{ A}$$

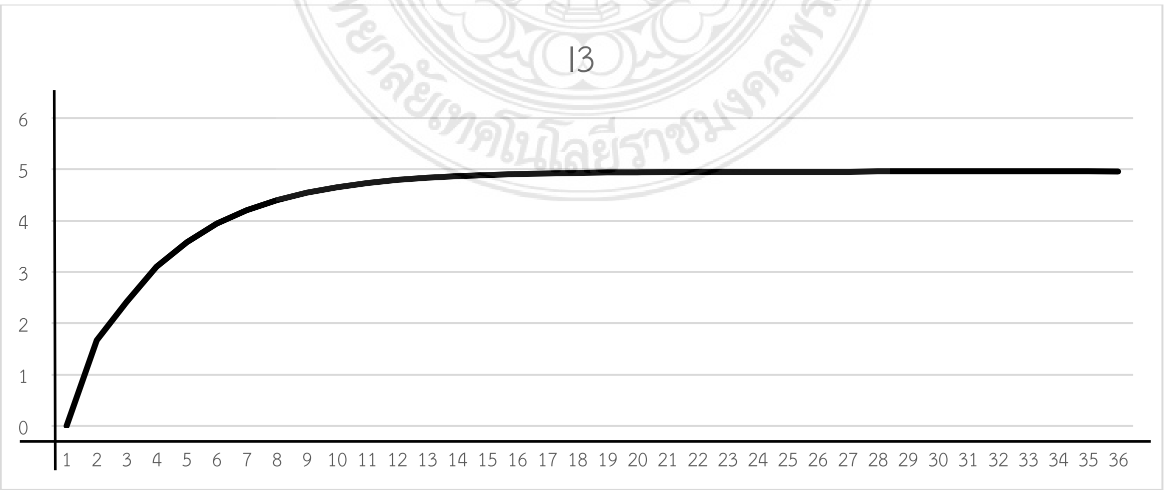
การลู่เข้าคำตอบของ I1 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน ดังแสดงในรูปที่ 2-4, การลู่เข้าคำตอบของ I2 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน ดังแสดงในรูปที่ 2-5, การลู่เข้าคำตอบของ I3 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน ดังแสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-4 การลู่เข้าคำตอบของ I1 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน



รูปที่ 2-5 การลู่เข้าคำตอบของ I2 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน



รูปที่ 2-6 การลู่เข้าคำตอบของ I3 โดยวิธีเก๊าส์ไอเทอเรชัน

2.8.2 การหาคำตอบด้วยวิธีเก๊าส์-ไซเดิล

วิธีคำนวณด้วยวิธีเก๊าส์-ไซเดิล (Gauss-Seidel Method) เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากการวนรอบด้วยวิธีเก๊าส์ การแทนค่าของผลลัพธ์จะแทนค่าลงไปทันทีในรอบของการคำนวณเดียวกันนั่นคือ ค่าสุดท้ายของ $x_1^{(k)}$,$x_2^{(k)}$ ครบรอบเช่นเดียวกับวิธีเก๊าส์ดังนั้นวิธีเก๊าซ์-ไซเดิล จะส่งผลทำให้ความเร็วรอบในการคำนวณของ $x_1^{(k)}$, $x_2^{(k)}$ ครบรอบเช่นเดียวกับวิธีเก๊าส์ ดังนั้นวิธีเก๊าส์-ไซเดิลจะส่งผลทำให้ความเร็วรอบในการคำนวณเข้าหาผลลัพธ์นั้นมีความเร็วมากกว่าวิธีการแบบเก๊าซ์ รวมทั้งค่าของจำนวณรอบของการคำนวณหลายๆครั้งก็จะมีจำนวณลดน้อยลง [5]

$$x_1^{(k)} = \frac{1}{a_{11}}\left[y_1 - a_{12}x_2^{(k-1)} - a_{13}x_2^{(k-1)} \dots - a_{1n}x_n^{(k-1)}\right] \;;\; k = 1, 2, 3, \dots, n \qquad (2.8.6)$$

ในสมการครั้งต่อไปที่ใช้การวนรอบครั้งที่ k ก็คือ $x_2^{(k)}$ นั่นคือ

$$x_2^{(k)} = \frac{1}{a_{22}}\left[y_2 - a_{21}\boxed{x_1^{(k)}} - a_{23}x_3^{(k-1)} \dots - a_{2n}x_n^{(k-1)}\right] \qquad (2.8.7)$$

$$x_3^{(k)} = \frac{1}{a_{33}}\left[y_3 - a_{31}\boxed{x_1^{(k)}} - a_{23}\boxed{x_2^{(k)}} \dots - a_{3n}x_n^{(k-1)}\right] \qquad (2.8.8)$$

และ

$$x_n^{(k)} = \frac{1}{a_{nn}}\left[y_n - a_{n1}\boxed{x_1^{(k)}} - a_{n2}\boxed{x_2^{(k)}} - \dots - a_{n,\,n-1}\boxed{x_{n-1}^{(k-1)}}\right] \qquad (2.8.9)$$

ค่าตัวแปรในสมการ 2.7 – 2.9 ตัวแปร $x_1^{(k)}$ $x_2^{(k)}$ และ $x_{n-1}^{(k-1)}$ จะแทนค่า $x^{(k)}$ ที่หาได้จากขั้นตอนก่อนในรอบที่ k

ตัวอย่างที่ 2.2 จากวงจรไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 2.1 ให้แก้ปัญหาของวงจรโดยใช้วิธีของเก๊าส์- ไซเดิล กำหนด 20 รอบ โดยผลต่างดัชนีต้องต่ำกว่า 0.01

วิธีทำ จากตัวอย่างที่ 2.1 ค่าเริ่มต้นของกระแสต่าง ๆ คือ

$$I_1^{(0)} = 12.5$$

$$I_2^{(0)} = -5$$

$$I_3^{(0)} = 0$$

แทนค่ากระแสในไอเทอเรชันเริ่มต้น เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 1

$$I_1^{(1)} = \frac{1}{8}\left[100+(3)(-5)+(4)(0)\right] = \boxed{10.625}$$

$$I_2^{(1)} = \frac{1}{10}\left[-50+(3)\left(\boxed{10.625}\right)+(5)(0)\right] = \boxed{-1.813}$$

$$I_3^{(1)} = \frac{1}{15}\left[0+(4)(10.625)+(5)\boxed{(-1.813)}\right] = \boxed{2.229}$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 2

$$I_1^{(2)} = \frac{1}{8}\left[100+(3)(-1.813)+(4)(2.229)\right] = 12.935$$

$$I_2^{(2)} = \frac{1}{10}\left[-50+(3)(12.935)+(5)(2.229)\right] = -0.005$$

$$I_3^{(2)} = \frac{1}{15}\left[0+(4)(12.935)+(5)(-0.005)\right] = 3.448$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 3

$$I_1^{(3)} = \frac{1}{8}\left[100+(3)(-0.005)+(4)(3.448)\right] = 14.222$$

$$I_2^{(3)} = \frac{1}{10}\left[-50+(3)(14.222)+(5)(3.448)\right] = 0.991$$

$$I_3^{(3)} = \frac{1}{15}\left[0+(4)(14.222)+(5)(0.991)\right] = 4.123$$

เมื่อดำเนินการไอเทอเรชันต่อไป จนกระทั่งถึงไอเทอเรชันที่ 11 จะมีค่ากระแส ดังนี้

$$I_1^{(11)} = \frac{1}{8}\left[100+(3)(2.203)+(4)(4.944)\right] = 15.798$$

$$I_2^{(11)} = \frac{1}{10}\left[-50+(3)(15.798)+(5)(4.944)\right] = 2.211$$

$$I_3^{(11)} = \frac{1}{15}\left[0+(4)(15.798)+(5)(2.211)\right] = 4.950$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 11 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 12

$$I_1^{(12)} = \frac{1}{8}\left[100+(3)(2.211)+(4)(4.950)\right] = 15.804$$

$$I_2^{(12)} = \frac{1}{10}\left[-50+(3)(15.804)+(5)(4.950)\right] = 2.216$$

$$I_3^{(12)} = \frac{1}{15}\left[0+(4)(15.804)+(5)(2.216)\right] = 4.953$$

สำหรับผลต่างของกระแส (ΔI) ระหว่างไอเทอเรชันที่ 12 และไอเทอเรชันที่ 11 คือ

$$\Delta I_1 = 15.804 - 15.798 = 0.006$$

$$\Delta I_2 = 2.216 - 2.211 = 0.005$$

$$\Delta I_3 = 4.953 - 4.950 = 0.003$$

ถ้าค่าดัชนีที่กำหนดเท่ากับ 0.01 ดังนั้น $\Delta I < 0.01$ การแก้ปัญหาเพื่อหาค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 จะลู่เข้าหาคำตอบรอบที่ 12 ผลของการคำนวณค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 มีค่า ดังนี้ดังนี้

$$I_1 = 15.794 \text{ A}$$

$$I_2 = 2.205 \text{ A}$$

$$I_3 = 4.943 \text{ A}$$

เมื่อเปรียบเทียบวิธีแก้ปัญหาด้วยวิธีไอเทอเรชันของเก๊าส์กับวิธีไอเทอเรชันของเก๊าส์-ไซเดิล ตามตัวอย่างที่ 4.1 และตัวอย่างที่ 4.2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาของสมการเชิงเส้นด้วย วิธีการวนรอบแบบเก๊าส์-ไซเดิลจะมีการลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วกว่า

การหาคำตอบวิธีการของเก๊าส์- ไซเดิลด้วยโปรแกรม Excel กำหนด 40 รอบ โดยผลต่างดัชนีต้องต่ำกว่า 0.01 จากตัวอย่างที่ 2.1

ตารางที่ 2-9 ค่าเริ่มต้นของกระแสต่าง ๆ

I_1	12.5
I_2	-5
I_3	0

ตารางที่ 2-10 แทนค่ากระแสในไอเทอเรชันเริ่มต้น เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 1

สมการ	1/8	(100	+ 3	I_2	+ 4	I_3)	ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	-5	4	0	10.6250	-1.8750
สมการ	1/10	(-50	+ 3	ผลลัพธ์ I_1	+ 5	I_3)	ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_2	0.1	-50	3	10.625	5	0	-1.8125	3.18750
สมการ	1/15	(0	+ 4	ผลลัพธ์ I_1	+ 5	ผลลัพธ์ I_2)	ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_3	0.0667	0	4	10.625	5	-1.8125	2.22917	2.22917

ตารางที่ 2-11 แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 2

Iter 2							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	-1.8125	4	2.22917	12.9349	2.30990
I_2	0.1	-50	3	12.9349	5	2.22917	-0.0049	1.80755
I_3	0.0667	0	4	12.9349	5	-0.0049	3.4476	1.21849

ตารางที่ 2-12 แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 3

Iter 3							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	-0.0049	4	3.44766	14.2219	1.28708
I_2	0.1	-50	3	14.2219	5	3.44766	-0.9904	0.99537
I_3	0.0667	0	4	14.2219	5	-0.9904	4.12267	0.67501

ตารางที่ 2-13 เมื่อดำเนินการไอเทอเรชันต่อไป จนกระทั่งถึงไอเทอเรชันที่ 24 จะมีค่ากระแส ดังนี้

Iter 24							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	2.22221	4	4.95726	15.8120	0.00001
I_2	0.1	-50	3	15.8120	5	4.95726	2.22222	0.00000
I_3	0.0667	0	4	15.8120	5	2.22222	4.95726	0.00000

ตารางที่ 2-14 แทนค่ากระแสของไอเทอเรชันที่ 24 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรชันที่ 25

Iter 25							ผลลัพธ์	ค่าความผิดพลาด
I_1	0.125	100	3	2.22221	4	4.95726	15.8120	0.00000
I_2	0.1	-50	3	15.8120	5	4.95726	2.22222	0.00000
I_3	0.0667	0	4	15.8120	5	2.22222	4.95726	0.00000

สำหรับผลต่างของกระแส (ΔI) ระหว่างรอบที่ 25 และรอบที่ 24 คือ

$$\Delta I_1 = 0.00000$$

$$\Delta I_2 = 0.00000$$

$$\Delta I_3 = 0.00000$$

การลู่เข้าของคำตอบจะสำเร็จได้เมื่อ ΔI มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีที่กำหนด เช่น $\Delta I < 0.01$ ดังนั้นการแก้ปัญหาในการวนรอบเพื่อหาค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 จะมีการลู่เข้าหาคำตอบประมาณ

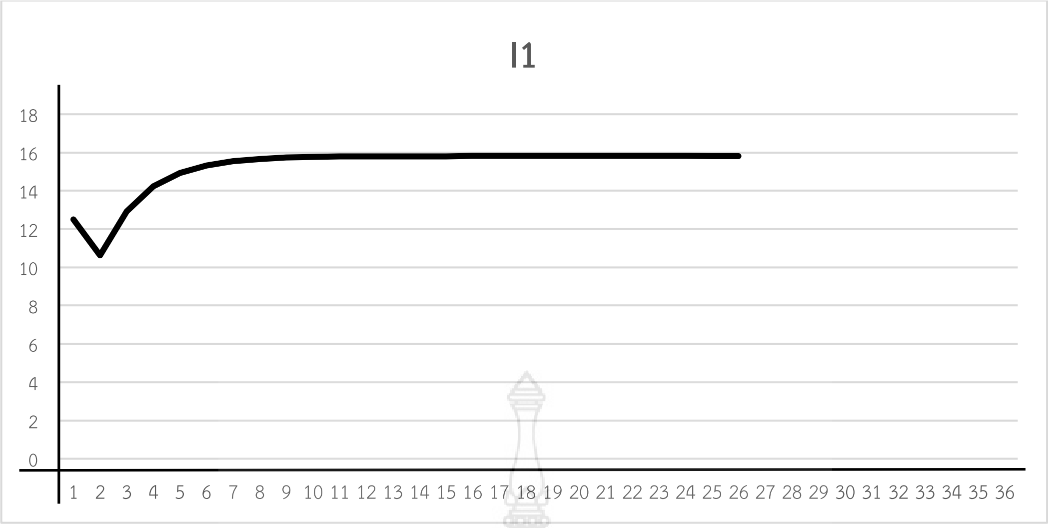
รอบที่ 25 ผลของการคำนวณค่ากระแส I_1, I_2 และ I_3 มีค่า ดังนี้

$$I_1 = 15.812 \text{ A}$$

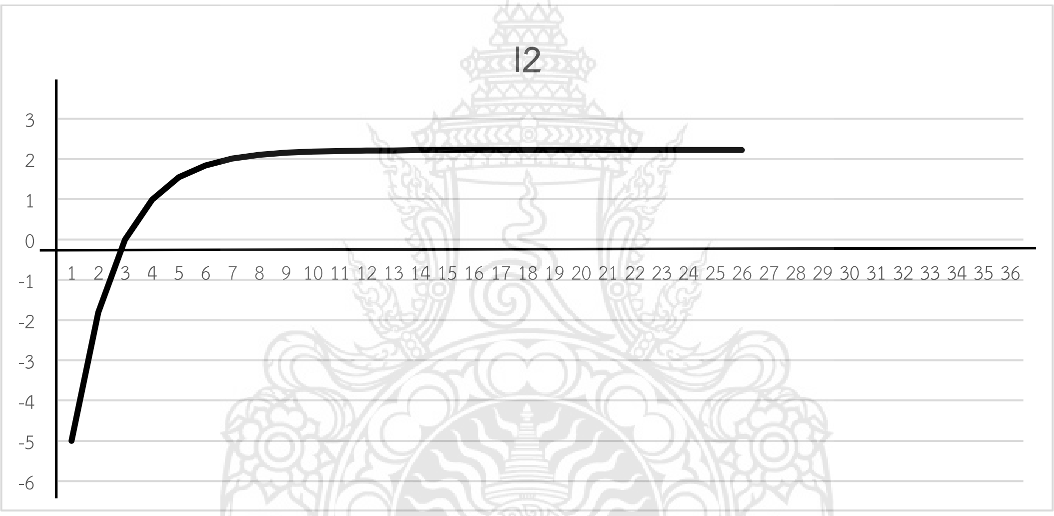
$$I_2 = 2.222 \text{ A}$$

$$I_3 = 4.957 \text{ A}$$

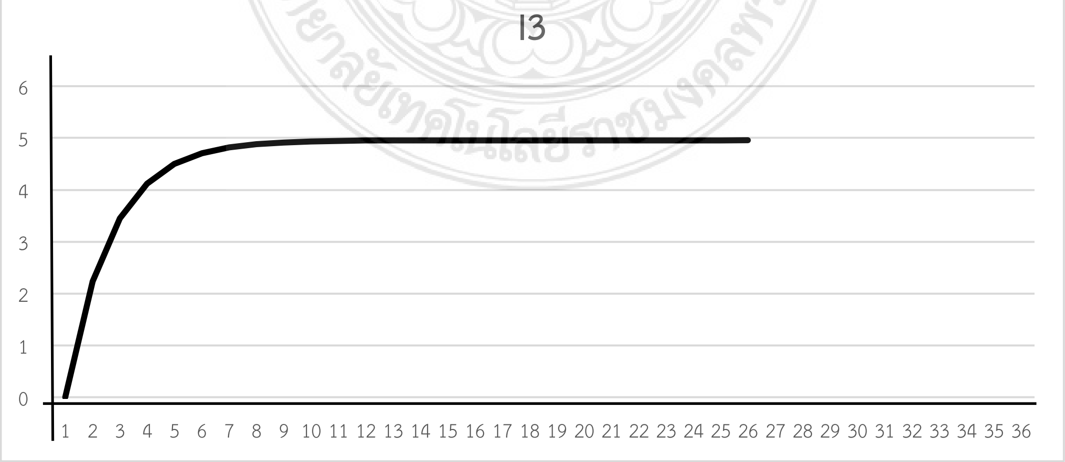
การลู่เข้าคำตอบของ I1 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล ดังแสดงในรูปที่ 2-4, การลู่เข้าคำตอบของ I2 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล ดังแสดงในรูปที่ 2-5, การลู่เข้าคำตอบของ I3 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล ดังแสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-7 การลู่เข้าคำตอบของ I1 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล



รูปที่ 2-8 การลู่เข้าคำตอบของ I2 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล



รูปที่ 2-9 การลู่เข้าคำตอบของ I3 โดยวิธีเก๊าส์- ไซเดิล

2.8.3 การหาคำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน [5]

เทคนิคของวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) จะใช้แก้ปัญหาสมการไม่เชิงเส้น สามารถหาคำตอบได้ด้วยการประมาณค่าและการทำไอเทอเรชัน จากฟังก์ชัน x ใดๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลรวมของอนุกรมกำลัง (Power Series) ได้ โดยเฉพาะการเขียนด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor’s Series) ได้ดังนี้

$$f(x) = f(a) + f^{'}(a)(x-a) + \frac{f^{''}(a)}{2!}(x-a)^2 + \ldots + \frac{f^{n}(a)}{n!}(x-a)^n + \ldots \qquad (2.8.10)$$

อนุกรมเทย์เลอร์นี้จะลู่เข้าได้รวดเร็วสำหรับค่าของ x ที่ใกล้กับ a ในการประมาณค่าคำตอบโดยสมมติให้ลู่เข้าด้วยการใช้เพียงสองเทอมแรกของสมการที่ (2.8.10) ถ้าแทน a ด้วย x และแทน x ด้วย (x+ Δ x) อนุกรมนี้จะมีค่าเป็น

$$y = f(x+\Delta x) = f(x) + f^{'}(x)\Delta x + \ldots \qquad (2.8.11)$$

สมการที่ (2.8.11) จะใช้ได้สำหรับสมการที่ไม่ทราบค่าตัวแปร x เพียงตัวเดียว ในขณะที่ไม่ทราบค่าตัวแปรหลายตัว (x_1,x_2,x_3,.....,x_n) ซึ่งแก้ปัญหาโดยการประยุกต์ใช้หลักการของสมการที่ไม่ทราบค่าตัวแปรเพียงตัวเดียว ดังนี้

กำหนด

$x^{(0)}$ = ค่าประมาณที่ 1

$x^{(1)}$ = ค่าประมาณที่ 2

เมื่อ

$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x$ แทนลงในสมการที่ (2.8.10) จะได้

$$f\left(x^{(1)}\right) = f\left(x^{(0)}\right) + f^{'}\left(x^{(0)}\right)(x^{(1)} - x^{(0)}) \qquad (2.8.12)$$

ถ้า $x^{(1)}$ เป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงคำตอบมากกว่า $x^{(0)}$ สามารถที่จะสมมุติให้เส้นโค้ง (Curve) ของสมการตัดกับแกน x เมื่อ $y^{(1)} = f\left(x^{(1)}\right) = 0$ ดังนั้น

$$0 = f\left(x^{(0)}\right) + f^{'}\left(x^{(0)}\right)(x^{(1)} - x^{(0)}) \qquad (2.8.13)$$

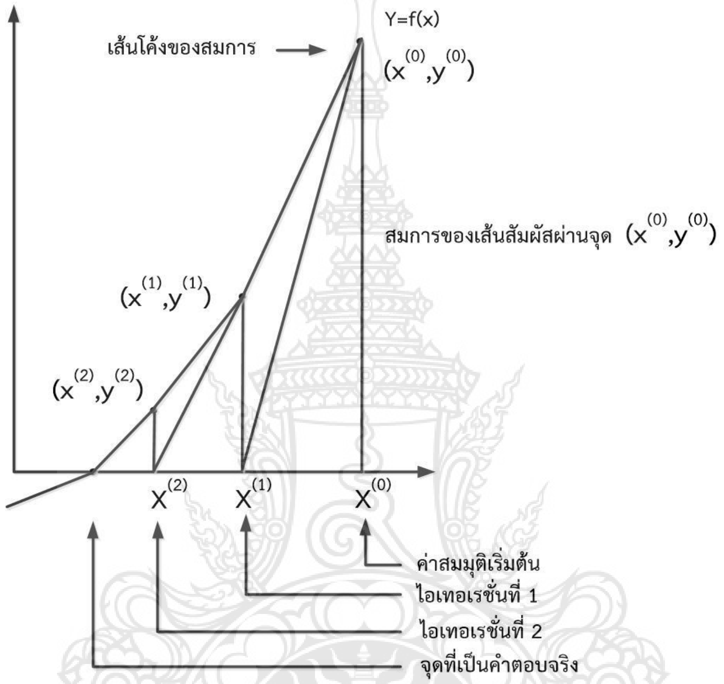
จากสมการที่ (2.8.13) สามารถหาค่าประมาณที่ 2 ในเทอมของค่าประมาณที่ 1 ได้ดังนี้

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f^{'}(x^{(0)})} \qquad (2.8.14)$$

จากสมการที่ (2.8.14) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปสำหรับการประมาณค่าที่ (k+1) เพื่อหาคำตอบของสมการเดียวและตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียวได้ดังนี้

$$x^{(k+1)} = x^{k} - \frac{f(x^{(k)})}{f^{'}(x^{(k)})} \tag{2.8.15}$$

สมการที่ (2.8.15) อาจหาได้อีกวิธีหนึ่งนอกเหนือจากการใช้อนุกรมเทย์เลอร์วิธีนี้ทำได้โดยการสมมติให้มีเส้นสัมผัส (Tangent Line) กับเส้นโค้งของสมการที่จุดประมาณที่ 1 ($x^{(0)}$,$y^{(0)}$) ดังแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 แนวความคิดสำหรับการหาสูตรประมาณค่าคำตอบด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน

จากภาพที่ 2 เมื่อเส้นสัมผัสกับจุด ($x^{(0)}$,$y^{(0)}$) มาตัดแกน x ที่จุด ($x^{(1)}$,$y^{(1)}$ =0) ก็จะได้คำตอบโดยประมาณใกล้เคียงมากกว่าค่าประมาณเริ่มต้นหรือค่าประมาณที่ 1 เมื่อเขียนสมการสำหรับเส้นสัมผัสหรือความชัน (Slope) ที่ ($x^{(0)}$,$y^{(0)}$) จะได้

$$\frac{dy}{dx} = f^{'}\left(x^{(0)}\right) = \frac{f(x^{(0)} - y^{(1)})}{x^{(0)} - x^{(1)}}$$

กำหนดให้ $y^{(1)}$ = 0 ดังนั้น

$$f^{'}\left(x^{(0)}\right) = \frac{f(x^{(0)})}{x^{(0)} - x^{(1)}}$$

จัดสมการเพื่อหาค่าประมาณค่าใหม่ คือ

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f^{'}(x^{(0)})} \quad (2.8.16)$$

จะเห็นได้ว่าแนวทางการหาสูตรค่าประมาณคำตอบของนิวตัน-ราฟสันด้วยวิธีการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์หรือวิธีลากเส้นสัมผัสเส้นโค้งของสมการก็จะได้สมการเดียวกัน และการประมาณค่าคำตอบให้ใกล้เคียงกับคำตอบจริงจะต้องดำเนินขั้นตอนไอเทอเรชันต่อไปจนกระทั่งลู่เข้าหาคำตอบที่แท้จริง

ต่อไปมาพิจารณาสมการไม่เชิงเส้น n สมการและมีตัวแปรไม่ทราบค่า n ตัว ($x_1,x_2,...,x_n$) ถ้าประยุกต์ใช้สมการที่ (2.8.12) จะได้ผลดังนี้

$$\left.\begin{array}{l} y_1 = f_1(x_1, x_2, ..., x_n) + \Delta x_1 \dfrac{\partial f_1}{\partial x_1} + \Delta x_2 \dfrac{\partial f_1}{\partial x_2} + ... + \Delta x_n \dfrac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_n = f_n(x_1, x_2, ..., x_n) + \Delta x_1 \dfrac{\partial f_n}{\partial x_1} + \Delta x_2 \dfrac{\partial f_n}{\partial x_2} + ... + \Delta x_n \dfrac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{array}\right\} \quad (2.8.17)$$

เมื่อ $\dfrac{\partial f}{\partial x}$ คือ อนุพันธ์บางส่วน (Partial Derivatives)

การประมาณค่าครั้งที่ 1 แทนตัวแปรไม่ทราบค่า $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, ..., x_n^{(0)}$

ดังนั้นไอเทอเรชันที่ 1 ที่ได้รับสำหรับการประมาณค่าคำตอบครั้งที่ 2 คือ

$$\left.\begin{array}{l} y_1 = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, ..., x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \dfrac{\partial f_1}{\partial x_1} + ... + \Delta x_n^{(0)} \dfrac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_n = f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, ..., x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \dfrac{\partial f_n}{\partial x_1} + ... + \Delta x_n^{(0)} \dfrac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{array}\right\} \quad (2.8.18)$$

ต่อจากนี้ไปจะเขียนอ้างอิงเทอม $f_k(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, ..., x_n^{(0)})$

ด้วย $f_k^{(0)}$ และโดยทั่วไปแล้วค่า $y_1,y_2,...,y_n$ จะทราบค่า สำหรับอนุพันธ์บางส่วนสามารถคำนวณเป็นปริมาตรตัวเลขได้ ดังนั้นในสมการจะมีปริมาณที่ไม่ทราบค่าคือ $\Delta x^{(0)}$ และสมการที่ (2.18) อาจจะเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned}
y_1 - f_1^{(0)} &= \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\bigg|\Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\bigg|\Delta x_2^{(0)} + \ldots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n}\bigg|\Delta x_n^{(0)} \\
y_2 - f_2^{(0)} &= \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\bigg|\Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\bigg|\Delta x_2^{(0)} + \ldots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n}\bigg|\Delta x_n^{(0)} \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
y_n - f_n^{(0)} &= \frac{\partial f_n}{\partial x_1}\bigg|\Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_n}{\partial x_2}\bigg|\Delta x_2^{(0)} + \ldots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n}\bigg|\Delta x_n^{(0)}
\end{aligned}\right\} \qquad (2.8.19)$$

สำหรับไอเทอเรชันที่ 1 สมการที่ไม่เชิงเส้นเดิมจะลดรูปให้เป็นสมการเชิงเส้น โดยอยู่ในรูปของ $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \ldots, \Delta x_n^{(0)}$

หลังจากแก้ปัญหาของสมการเชิงเส้นหาค่าส่วนเพิ่ม (Δx) ได้แล้วการปริมาณค่า x ใหม่สำหรับการทำต่อไป คือ

$$\left.\begin{aligned}
x_1^{(1)} &= x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \\
x_2^{(1)} &= x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots \\
x_n^{(1)} &= x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}
\end{aligned}\right\} \qquad (2.8.20)$$

กระบวนการไอเทอเรชันของสมการที่ (2.8.19) จะถูกทำซ้ำจนกระทั่ง Δx มีค่าน้อยกว่าดัชนีกำหนดเพียงพอที่จะสอดคล้องกับคำตอบ เช่น กำหนดให้ $|\Delta x| \leq 0.001$ เป็นต้น และเพื่อความสะดวกสมการที่ (2.8.19) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1^{(0)} \\ y_2 - f_2^{(0)} \\ \ldots\ldots \\ y_n - f_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\Big| \ldots \frac{\partial f_1}{\partial x_n}\Big| \\ \ldots\ldots\ldots \\ \frac{\partial f_n}{\partial f_1}\Big| \ldots \frac{\partial f_n}{\partial x_n}\Big| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \ldots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \qquad (2.8.21)$$

เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์อนุพันธ์บางส่วนในบางครั้งจะถูกเรียกว่า จาโคเบียนเมทริกซ์ (Jacobian Matrix)และในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าในอาร์เรย์ของ Δx จะต้องใช้เทคนิคการลดรูปแบบต่างๆ (Matrix Reduction) หรือกระบวนการอินเวิร์ส (Matrix Inversion) จาโคเบียนเมทริกซ์

2.9 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาโหลดโฟลของระบบไฟฟ้ากำลังมี 2 สมการ คือ สมการหาแรงดันไฟฟ้า และสมการหากำลังไฟฟ้า [4][5]

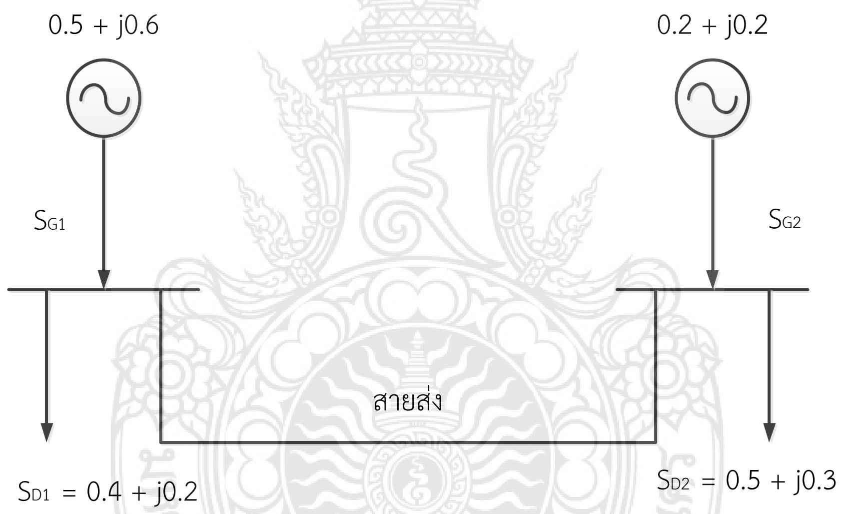
สมการกำลังไฟฟ้าที่เข้าบัส k ใดๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้าดังนี้

$$S_k = V_k I_k \tag{2.9.1}$$

เมื่อ V_k แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_k กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส

สมการนี้มาจากสมมติฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ S_k จะมีค่าเป็นบวกสำหรับกรณีโหลดล้าหลัง (Lagging) นั่นคือเวกเตอร์กระแส I_k จะตามหลังเวกเตอร์แรงดัน V_k กำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นจะไหลเข้าระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส

กำลังไฟฟ้ารวมที่บัส 1

$$S1 = (0.5 + j0.6) – (0.4 + 0.2) = 0.1 + j0.4$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่บัส 2

$$S2 = (0.2 + j0.2) – (0.5 + j0.3) = - 0.3 – j0.1$$

จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเป็นลบเมื่อต้องการหากำลังไฟฟ้ารวมของบัสทั้งนี้เพราะกำลังไฟฟ้าที่บัสถูกนิยามว่าเป็นกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสตามทิศทางกระแสไฟฟ้า I_k ที่ไหลเข้าบัส

โดยที่

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I^*_k \tag{2.9.2}$$

$$S^*_k = P_k - jQ_k = V^*_k I_k \tag{2.9.3}$$

หากกระแสที่ไหลผ่านบัส *k* จากสมการที่ จะได้ว่า

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \tag{2.9.4}$$

จากสมการเมทริกซ์ $[I_{bus}] = [Y_{bus}]\ [V_{bus}]$ สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้า I_k ได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่มี n บัส

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \ldots + Y_{kn}V_n = \sum_{i=1}^{n} Y_{k1}V_i \tag{2.9.5}$$

แทนค่ากระแสไฟฟ้า I_k จากสมการที่ (2.9.5) ในสมการที่ (2.9.6) จะได้

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \ldots + Y_{kn}V_n = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \tag{2.9.6}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดๆมีค่าดังนี้

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}}\left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1}^{n} Y_{ki}V_i\right] \tag{2.9.7}$$

จากสมการนี้เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) โดยสมการที่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าบัสและแอดมิตแตนซ์ของระบบได้ โดยแทนสมการที่ (2.9.5) เข้าไปในสมการที่ (2.9.3) จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^*\left[\sum_{i=1}^{n} Y_{ki}V_i\right] \tag{2.9.8}$$

กำลังไฟฟ้าจริง

$$P_k = \mathrm{Re}\left[V_k^* \sum_{i=1}^{n} Y_{ki}V_i\right] \tag{2.9.9}$$

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

$$Q_k = -\mathrm{Im}\left[V_k^* \sum_{i=1}^{n} Y_{ki}V_i\right] \tag{2.9.10}$$

กำหนดให้ R_e คือ ส่วนค่าจริง Real Part

I_m คือ ส่วนค่าจินตภาพ Imaginary Part

2.10 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.10.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเก๊าส์-ไซเดิ้ล (Gauss-Seidel)

สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.10.1

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=1}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \qquad (2.10.1)$$

หาแรงดันที่บัส i ด้วยวิธีเก๊าส์-ไซเดิล จากสมการที่ 2.9.7

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\dfrac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j\neq 1} Y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \qquad (2.10.2)$$

(k คือ แสดงลำดับการคำนวณหาคำตอบใหม่, ค่า k เริ่มต้นเท่ากับ 0)

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i หาได้จาก

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j$$

จะได้

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left[V_i \sum_{j=0}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \right]$$

เมื่อใช้วิธีเก๊าส์-ไซเดิล จะได้

$$P_i^{(k+1)} = \mathrm{Re}\left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_i^{(k)} \right] \right\} \qquad j \neq 1$$

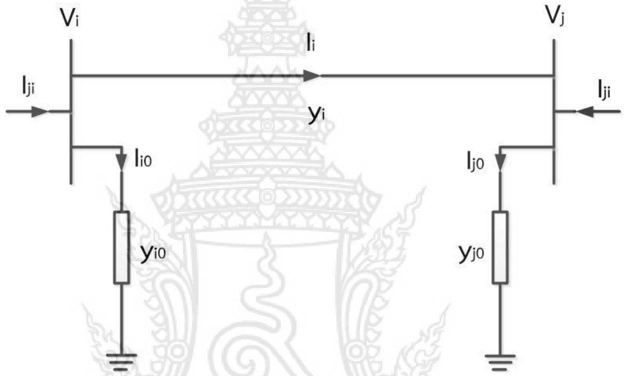
$$Q_i^{(k+1)} = -\mathrm{Im}\left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_i^{(k)} \right] \right\} \qquad j \neq 1$$

เขียนสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟใหม่ได้เป็น

$$\text{ใหม่} \quad P_i^{(k+1)} = \mathrm{Re}\left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^{n} y_{ii} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_i^{(k)} \right] \right\} \qquad j \neq 1$$

$$\text{ใหม่} \quad Q_i^{(k+1)} = -\mathrm{Im}\left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^{n} y_{ii} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_i^{(k)} \right] \right\} \qquad j \neq 1$$

การไหลของกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสาย (Power Flow and Power Loss) จากวงจรระบบกำลังไฟฟ้ามีทิศทางต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 ทิศทางการไหลของกระแสในระบบไฟฟ้ากำลัง

การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow)

จากบัส i ไปยังบัส j พบว่า

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

และกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส i ไปยังบัส j คือ

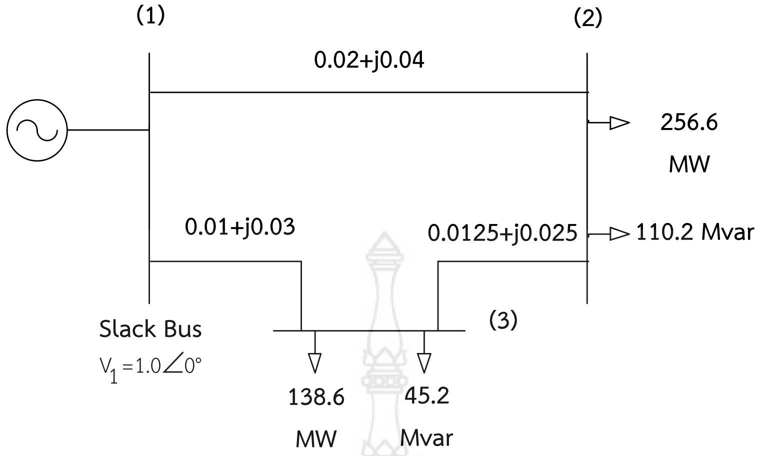
$$S_{ij} = V_i I_{ij}^*$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสาย (Power Loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งระหว่างบัส i ไปยังบัส j มีค่าเท่ากับ

$$S_{L,ij} = S_{ij} + S_{ji}$$

ตัวอย่างที่ 2.3 จากระบบไฟฟ้ากำลัง ดังแสดงในรูปที่ 2-13 กำหนดค่าค่าอิมพีแดนซ์เป็น p.u. คิดจากค่าฐาน 100 MVA โดยที่ระบบไม่คิดค่าแอดมิตแตนซ์ขนาน กำหนดค่า ε เท่ากับ $\varepsilon \leq 5\times10^{-4}$



รูปที่ 2-13 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

จงหา

- แรงดัน (V) และมุมเฟสแรงดัน (δ) ที่บัส 2 และ บัส 3 (P – Q bus)
- โดยใช้วิธีเก๊าส์-ไซเดิล (Gauss – Seidel)
- ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ที่บัสอ้างอิง

วิธีทำ

หาเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ [Y]

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{10}+y_{12}+y_{13} & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{21} & y_{20}+y_{21}+y_{23} & -y_{23} \\ -y_{31} & -y_{32} & y_{30}+y_{31}+y_{32} \end{bmatrix}$$

$$y_{11} = \frac{1}{0.02+j0.04} + \frac{1}{0.01+j0.03} = 20 - j50 \;;\; y_{12} = y_{21} = \frac{1}{0.02+j0.04} = 10 - j20$$

$$y_{22} = \frac{1}{(0.02+j0.04)} + \frac{1}{(0.0125+j0.025)} = 26 - j52 \;;\; y_{13} = y_{31} = \frac{1}{0.01+j0.03} = 10 - j30$$

$$y_{33} = \frac{1}{(0.01+j0.03)} + \frac{1}{(0.0125+j0.025)} = 26 - j62 \;;\; y_{23} = y_{32} = \frac{1}{0.0125+j0.025} = 16 - j3$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 20-j50 & -10+j20 & -10+j30 \\ -10+j20 & 26-j52 & -16+j32 \\ -10+j30 & -16+j32 & 26-j62 \end{bmatrix}$$

Load Bus (P-Q Bus) หาค่า P, Q ในรูปของ p.u.

บัส 2 $s_2^{sch} = -\frac{(256.6 + j110.2)}{100} = -2.566 - j1.102$ p.u.

บัส 3 $s_3^{sch} = -\frac{(138.6 + j45.2)}{100} = -1.386 - j0.452$ p.u.

การคำนวณรอบที่ 1 (Iteration #1) : (k=1)

จาก
$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j \neq i} Y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}}$$

โดยกำหนดค่าเริ่มต้น $V_2^{(0)} = V_3^{(0)} = 1.0 + j0.0$

บัส 2
$$V_2^{(1)} = \frac{\frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^{*(0)}} - Y_{21}V_1 - Y_{23}V_3^{(0)}}{Y_{22}}$$

$$= \frac{\frac{-2.566 + j1.102}{1.0 - j0} - (-10 + j20)(1.05 + j0) - (-16 + j32)(1.0 + j0)}{(26 - j52)}$$

$$= 0.9825 - j0.0310$$

บัส 3
$$V_3^{(1)} = \frac{\frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^{*(0)}} - Y_{31}V_1 - Y_{32}V_2^{(1)}}{Y_{33}}$$

$$= \frac{\frac{-1.386 + j0.452}{1.0 - j0} - (-10 + j30)(1.05 + j0) - (-16 + j32)(0.9825 + j0.0310)}{(26 - j62)}$$

$$= 1.0011 - j0.0353$$

การคำนวณรอบที่ 2 (Iteration #2)

$$V_2^{(2)} = \frac{\frac{-2.566 + j1.102}{V_2^{*(1)}} - (-10 + j20)(1.05 + j0) - (-16 + j32)V_3^{(1)}}{(26 - j52)}$$

$$= \frac{\dfrac{-2.566 + j1.102}{0.9825 + j0.0310} - \left(-10 + j20\right)\left(1.05 + j0\right) - \left(-16 + j32\right)(1.0011 - j0.0353)}{(26 - j52)}$$

$$= 0.9816 + j0.0520$$

$$V_3^{(2)} = \frac{\dfrac{-1.386 + j0.452}{V_3^{*(1)}} - \left(-10 + j20\right)\left(1.05 + j0\right) - \left(-16 + j32\right)V_2^{(2)}}{(26 - j62)}$$

$$= \frac{\dfrac{-1.386 + j0.452}{1.0011 + j0.0353} - \left(-10 + j30\right)\left(1.05 + j0\right) - \left(-16 + j32\right)(0.9816 - j0.0520)}{(26 - j62)}$$

$$= 1.0008 + j0.0459$$

คำนวณไปทีละ iteration จนคำตอบลู่เข้า (Converged) โดยที่ $\varepsilon \le 5 \times 10^{-4}$

$$V_2^{(3)} = 0.9808 - j0.0578 \qquad V_3^{(3)} = 1.0004 - j0.0488$$

$$V_2^{(4)} = 0.9803 - j0.0594 \qquad V_3^{(4)} = 1.0002 - j0.0497$$

$$V_2^{(5)} = 0.9801 - j0.0598 \qquad V_3^{(5)} = 1.0001 - j0.0499$$

$$V_2^{(6)} = 0.9801 - j0.0599 \qquad V_3^{(6)} = 1.0000 - j0.0500$$

$$V_2^{(7)} = 0.9800 - j0.0600 \qquad V_3^{(7)} = 1.0000 - j0.0500$$

คำตอบสุดท้ายคือ

$$V_2 = 0.9800 - j0.0600 = 0.98183\angle -3.5035^{\circ}$$

$$V_3 = 1.0000 - j0.0500 = 1.00125\angle -2.8624^{\circ}$$

หา P และ Q ที่บัสอ้างอิง สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j$$

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* \left[V_1\left(y_{12} + y_{13}\right) - \left(y_{12}V_2 + y_{13}V_3\right)\right]$$

$$= 1.05\left[1.05\left(20 - j50\right) - \left(10 - j20\right)\left(0.98 - j0.06\right) - \left(10 - j30\right)\left(1.0 - j0.05\right)\right]$$

$$= 4.095 - j1.890 \quad \text{p.u.}$$

$$= 409.5 - j189 \quad \text{MVA}$$

หาทิศทางและการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow)

จาก $I_{ij} = I_{l} + I_{i0} = y_{ij}\left(V_i - V_j\right) + y_{i0}V_i$

$$I_{12} = y_{12}\left(V_1 - V_2\right) = \left(10 - j20\right)\left[\left(1.05 + j0\right) - \left(0.98 - j0.06\right)\right]$$

$$= 1.9 - j0.8$$

$$I_{21} = -I_{12} = -1.9 + j0.8$$

$$I_{13} = y_{31}\left(V_1 - V_3\right) = \left(10 - j30\right)\left[\left(1.05 + j0\right) - \left(1.0 - j0.05\right)\right]$$

$$I_{31} = -I_{13} = -2.0 + j1.0$$

$$I_{32} = y_{23}\left(V_2 - V_3\right) = \left(16 - j32\right)\left[\left(0.98 + j0.06\right) - \left(1.0 - j0.05\right)\right]$$

$$= -0.64 - j0.48$$

$$I_{32} = I_{-23} = 0.64 - j0.48$$

$$S_{12} = V_1 I_{1 12}^{*} = \left(0.98 + j0.006\right)\left(-1.9 - j0.8\right)$$
$$= 1.995 + j0.84 \text{ p.u.}$$
$$= 199.5\text{MW} + j84.0\text{Mvar}$$

$$S_{21} = V_2 I_{2 21}^{*} = \left(1.05 + j0.0\right)\left(1.9 + \ j0.8\right)$$
$$= -1.91 - j0.67 \text{ p.u.}$$
$$= -191.0\text{MW} - j67.0\text{Mvar}$$

$$S_{13} = V_1 I_{1 13}^{*} = \left(1.05 + j0.0\right)\left(2.0 + j1.0\right)$$
$$= 2.1 + j1.05 \text{ p.u.}$$
$$= 210.0\text{MW} + j105.0\text{Mvar}$$

$$S_{31} = V_3 I_{3 31}^{*} = \left(1.0 + j0.05\right)\left(-2.0 - j1.0\right)$$
$$= -2.05 - j0.90 \text{ p.u.}$$
$$= -205.0\text{MW} - j90.0\text{Mvar}$$

$$S_{23} = V_2 I_{2 23}^{*} = \left(0.98 - j0.06\right)\left(-0.656 + j0.48\right)$$
$$= -0.656 - j0.432 \text{ p.u.}$$
$$= -65.6\text{MW} - j43.2 \text{ Mvar}$$

$$S_{32} = V_3 I_{3 32}^{*} = \left(1.0 - j0.05\right)\left(0.64 + j0.48\right)$$
$$= 0.664 + j0.448 \text{ p.u.}$$
$$= 66.4\text{MW} + j44.8 \text{ Mvar}$$

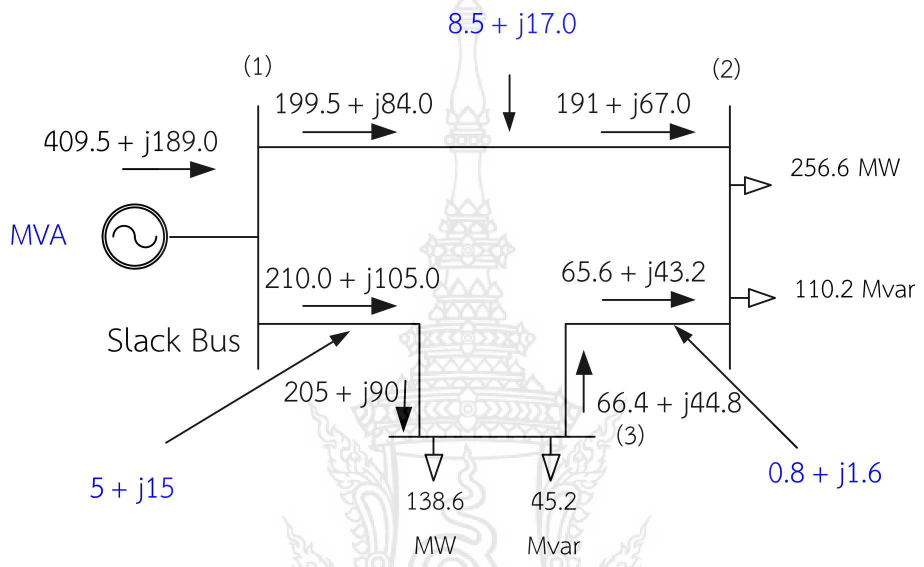
การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss) จากสูตร $S_{L,ij} = S_{ij} + S_{ji}$

$S_{L,12} = S_{12} + S_{21}$ = 8.5MW + j17.0 Mvar

$S_{L,13} = S_{13} + S_{31}$ = 5.0MW + j15.0 Mvar

$S_{L,23} = S_{23} + S_{32}$ = 0.8MW + j1.60 Mvar

เขียนแผนภาพแสดงทิศทางและขนาดการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบดังแสดงในรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 ทิศทางและขนาดการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ

สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดโฟล์ว วิธีวิธีเก๊าส์-ไซเดิ้ล (Gauss-Seidel)

1. Swing Bus (Gen Bus)

   - กำหนดค่าเริ่มต้นเป็น 1+j0.0ค

2. PQ Bus (Load Bus)

   - ทราบค่า P_i^{sch} และ Q_i^{sch}

   - หาค่าแรงดัน $V_i^{(k+1)}$ จาก P_i^{sch} และ Q_i^{sch} ที่ทราบค่า

3. PV Bus (Gen Bus)

   - ทราบค่า P_i^{sch} และ $|V_i|$

   - หาค่า $Q_i^{(k+1)}$ โดยใช้ P_i^{sch} และ $|V_i|$ ที่ทราบ

- ใช้ค่า $Q_i^{(k+1)}$ ที่ได้มาหาค่า $V_i^{(k+1)}$ ต่อ

- แต่ $\left|V_i\right|$ คงที่และค่า $V_i^{(k+1)}$ เปลี่ยนเฉพาะ "ส่วนจินตภาพ"

4. การใช้ตัวเร่งเพื่อให้การ Iteration ลู่เข้าหาคำตอบเร็วขึ้น

โดยทั่วไปใช้ตัวเร่ง α ระหว่าง 1.3 ถึง 1.7 โดยที่ $V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + a\left(V_{i,cal}^{(k)} - V_i^{(k)}\right)$

2.10.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newtpn-Raphson)

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ด้วยสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left(V_i Y_{ii} + \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j \right) \qquad \left(j \neq i\right)$$

ถ้ากำหนดให้ j เท่ากับ i จะได้สมการเป็น

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_i \qquad \left(j = i\right)$$

สมมติค่าพารามิเตอร์ต่างๆในรูปเชิงขั้ว (Polar Form)

$$V_i = \left|V_i\right| \angle \theta_i \qquad V_j = \left|V_j\right| \angle \theta_j \qquad V_{ij} = \left|V_{ij}\right| \angle \theta_{ij}$$

จะได้

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^{n} \left|V_i V_j Y_{ij}\right| \angle\left(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i\right)$$

กำลังไฟฟัสจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) หาได้ดังนี้

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} \left|V_i V_j Y_{ij}\right| \mathrm{Cos}\left(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i\right)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} \left|V_i V_j Y_{ij}\right| \mathrm{Sin}\left(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i\right)$$

รูปแบบสมการเมทริกซ์สำหรับการวิเคราะห์ Newton-Raphson คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix}$$

สำหรับบัสอ้างอิง (Reference Bus) จะไม่นำมาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากทราบค่า $|V_i|$ และ δ โดยกำหนดค่าให้เท่ากับ $1\angle 0^\circ$

หาแมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ [Y]

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11}\angle\theta_{11} & Y_{12}\angle\theta_{12} & Y_{13}\angle\theta_{13} \\ Y_{21}\angle\theta_{21} & Y_{22}\angle\theta_{22} & Y_{23}\angle\theta_{23} \\ Y_{31}\angle\theta_{31} & Y_{32}\angle\theta_{32} & Y_{33}\angle\theta_{33} \end{bmatrix}$$

หา P_i,Q_i จาก

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \, Cos(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \, Sin(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i)$$

สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดโฟล์ว วิธีนิวตัน-ราฟสัน

1. ที่บัสโหลด

1.1 ทราบค่า P_i^{sch} และ Q_i^{sch}

1.2 กำหนดค่าแรงดันที่บัสเริ่มต้นบัสอ้างอิง, $\left|V_i^{(0)}\right| = 1$ และ, $\delta_i^{(0)} = 0$

1.3 หาค่า $P_i^{(k)}, Q_i^{(k)}$ จาก

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \, Cos(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \, Sin(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i)$$

1.4 หาค่า $\Delta P_i^{(k)}, \Delta Q_i^{(k)}$ จาก

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,sch} - P_{i,cal}^{(k)}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,sch} - Q_{i,cal}^{(k)}$$

2. ที่บัสควบคุมแรงดัน

2.1 ทราบค่า $P_{i,sch}$

2.2 กำหนดให้ค่ามุมเฟสแรงดันบัสเริ่มต้นที่บัสอ้างอิง, $\delta_i^{(0)} = 0$

2.3 ทราบค่า $P_i^{(k)}$ จาก

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} \left|V_i V_j Y_{ij}\right| \mathrm{Cos}\left(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i\right)$$

2.4 หาค่า $\Delta P_i^{(k)}$ จาก

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,sch} - P_i^{(k)}$$

3. หาสมาชิกแต่ละตัวในเมทริกซ์จาโคเบียน [J]

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} \\ \vdots & J_1 & \vdots & \vdots & J_2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} \\ \vdots & J_3 & \vdots & \vdots & J_4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta \left|V_2^{(k)}\right| \\ \vdots \\ \Delta \left|V_n^{(k)}\right| \end{bmatrix}$$

$$[J]=\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

โดยแทนค่า $V_i^{(k)}\angle\delta_i^{(k)}, V_j^{(k)}\angle\delta_j^{(k)}, Y_{ij}^{(k)}\angle\delta_{ij}^{(k)}$

4. หาค่า $\Delta\delta_i^{(k)}, \Delta\left|V_i^{(k)}\right|$ จาก

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_i^{(k)} \\ \Delta\left|V_i^{(k)}\right| \end{bmatrix} = \left[J^{(k)}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} \end{bmatrix}$$

5. หาค่า

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)}$$

$$\left|V_i^{(k+1)}\right| = \left|V_i^{(k)}\right| + \Delta\left|V_i^{(k)}\right|$$

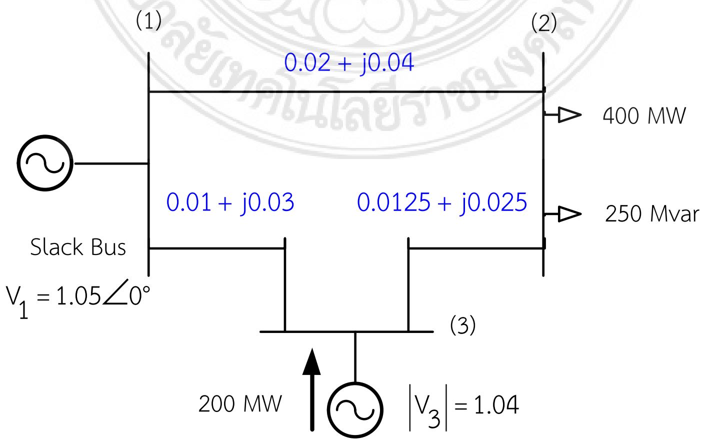
6. กลับไปทำขั้นตอน 1 ใหม่โดยใช้ $\Delta\delta_i^{(k+1)}, \Delta\left|V_i^{(k+1)}\right|$

7. ทำเรื่อยๆจนกระทั่ง

$$\left|P_i^{(k)}\right| \le \varepsilon \quad \text{และ} \quad \left|Q_i^{(k)}\right| \le \varepsilon$$

*จะไม่ใช้บัส 1 ในการหา [J] เนื่องจากเป็นบัสอ้างอิง

ตัวอย่างที่ 4.4 จงวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2-15 ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน



รูปที่ 2-15 ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ในการคำนวณด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน

ขั้นตอนที่ 1 เขียนสมการนิวตัน-ราฟสัน จากแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta|V_i| \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta|V_2| \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 2

เมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ $[Y]$ เท่ากับ

$$[Y] = \begin{bmatrix} 20 - j50 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{bmatrix}$$

เขียน $[Y]$ ในรูปเชิงขั้ว (Polar Form) ได้เป็น (มุมในหน่วยเรเดียน $\frac{2\pi}{360}$)

$$[Y] = \begin{bmatrix} 53.85165\angle -1.1902 & 22.36068\angle 2.0344 & 31.62278\angle 1.8925 \\ 22.36068\angle 2.0344 & 58.13777\angle -1.1071 & 35.77709\angle 2.0344 \\ 31.62278\angle 1.8925 & 35.77709\angle 2.0344 & 67.23095\angle -1.1737 \end{bmatrix}$$

จากวงจรพบว่า

- บัส 1 เป็น บัสอ้างอิง ไม่นำมาคิด
- บัส 3 เป็น บัสควบคุมแรงดัน ไม่นำ $Q_3, |V_3|$ มาคิด

ขั้นตอนที่ 3

<u>รอบที่ 1</u>

การหาค่า P_i และ Q_i ในรอบที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นของบัส 2 และบัส 3

บัส1 $|V_1| = 1.05$ และ $\delta_1 = 0$

บัส2 $|V_2^{(0)}| = 1$ และ $\delta_2^{(0)} = 0$

บัส3 $|V_3| = 1.04$ และ $\delta_3^{(0)} = 0$

หาค่า P ที่บัส 2 และ 3 จาก $P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| Cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$

$$P_2 = |V_2||V_1||Y_{21}|Cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2||V_2||Y_{22}|Cos(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) +$$
$$|V_2||V_3||Y_{23}|Cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$
$$= |V_2||V_1||Y_{21}|Cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2|^2|Y_{22}|Cos(\theta_{22}) +$$
$$|V_2||V_3||Y_{23}|Cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$

$$P_2^{(0)} = \left|V_2^{(0)}\right||V_1||Y_{21}|cos\left(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2^{(0)}\right) + \left|V_2^{(0)}\right|^2|Y_{22}|cos(\theta_{22}) +$$
$$\left|V_2^{(0)}\right||V_3||Y_{23}|cos\left(\theta_{23} + \delta_3^{(0)} - \delta_2^{(0)}\right)$$
$$= |1.0||1.05||22.36068|Cos(2.0344 + 0 - 0) + |1.0|^2|58.13777|Cos(-1.1071) +$$
$$|1.0||1.04||35.77709|Cos(2.0344 + 0 - 0)$$
$$= -1.14$$

$$P_3 = |V_3||V_1||Y_{31}|Cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |V_3||V_2||Y_{32}|Cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) +$$
$$|V_3|^2|Y_{33}|Cos(\theta_{33})$$

$$P_3^{(0)} = |V_3||V_1||Y_{31}|Cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |V_3||V_2||Y_{32}|Cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) +$$
$$|V_3|^2|Y_{33}|Cos(\theta_{33})$$
$$= |1.04||1.05||31.62278|Cos(1.8925 + 0 - 0) + |1.04||1.0||35.77709|$$
$$Cos(2.0344) + |1.04|^2|67.23095|Cos(-1.1737)$$
$$= 0.5616$$

หาค่า Q ที่บัส 2 ได้จาก $Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$

$$Q_2 = -|V_2||V_1||Y_{21}|Sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2||V_2||Y_{22}|Sin(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) -$$
$$|V_2||V_3||Y_{23}|Sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$
$$= -|V_2||V_1||Y_{21}|Sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2|^2|Y_{22}|Sin(\theta_{22}) -$$
$$|V_2||V_3||Y_{23}|Sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$

$$Q_2^{(0)} = -|V_2||V_1||Y_{21}|\text{Sin}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2|^2|Y_{22}|\text{Sin}(\theta_{22}) - |V_2||V_3||Y_{23}|\text{Sin}(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$

$$Q_2^{(0)} = -|1.0||1.05||22.36068|\text{Sin}(2.0344 + 0 - 0) - |1.0|^2|58.13777| \text{Sin}(-1.1071) - |1.0||1.04||35.77709|\text{Sin}(2.0344 + 0 - 0)$$

$$= -2.28$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่า P^{sch} ของบัส 2 บัส 3 และ Q^{sch} ของบัส 2 ในระบบเปอร์ยูนิต (p.u.)

บัส 2 $S_2^{sch} = P + jQ = -\dfrac{(400 + j250)}{100} = -4.0 - j2.5$ p.u.

กำลังไฟฟ้าไหลเข้าบัส S มีค่าลบ

บัส 3 $P_3^{sch} = \dfrac{200}{100} = 2.0$ p.u.

กำลังไฟฟ้าไหลออกจากบัส P มีค่าบวก

สามารถหา Power Residusls ที่บัสต่าง ๆ ได้เท่ากับ

$$\Delta P_2^{(0)} = P_2^{sch} - P_2^{(0)} = -4.0 - (-1.14) = -2.8600$$

$$\Delta P_3^{(0)} = P_3^{sch} - P_3^{(0)} = 2.0 - (0.5616) = 1.4384$$

$$\Delta Q_2^{(0)} = Q_2^{sch} - Q_2^{(0)} = -2.5 - (-2.28) = -0.2200$$

ขั้นตอนที่ 5 หาสมาชิกแต่ละตัวในเมทริกซ์จาโคเบียน

$$\left[J^{(0)}\right] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_2} & \dfrac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_3} & \dfrac{\partial P_2^{(0)}}{\partial |V_2|} \\ \dfrac{\partial P_3^{(0)}}{\partial \delta_2} & \dfrac{\partial P_3^{(0)}}{\partial \delta_3} & \dfrac{\partial P_3^{(0)}}{\partial |V_2|} \\ \dfrac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_2} & \dfrac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_3} & \dfrac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial |V_2|} \end{bmatrix}$$

หาสมาชิกแต่ละตัวในเมทริกซ์จาโคเบียน $[J]$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_2} = \frac{\partial}{\partial \delta_2}\begin{bmatrix} |V_2||V_1||Y_{21}|\mathrm{Cos}(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)+|V_2|^2|Y_{22}|\mathrm{Cos}(\theta_{22})+ \\ |V_2||V_3||Y_{23}|\mathrm{Cos}(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2) \end{bmatrix}$$

จากสูตร $\frac{d}{dx}\mathrm{Cos}u = -\mathrm{Sin}u\frac{du}{dx}$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_2} = -|V_2||V_1||Y_{21}|\mathrm{Sin}(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)\frac{\partial}{\partial \delta_2}(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)$$

$$-|V_2||V_3||Y_{23}|\mathrm{Sin}(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2)\frac{\partial}{\partial \delta_2}(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}|\mathrm{Sin}(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)+|V_2||V_3||Y_{23}|\mathrm{Sin}(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2)$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_2} = \left|V_2^{(0)}\right||V_1||Y_{21}|\mathrm{Sin}\left(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2^{(0)}\right)+\left|V_2^{(0)}\right||V_3||Y_{23}|$$

$$\mathrm{Sin}\left(\theta_{23}+\delta_3^{(0)}-\delta_2^{(0)}\right)$$

$$= |1.0||1.05||22.36068|\mathrm{Sin}(2.0344+0-0)+|1.0||1.04||35.77709|$$

$$\mathrm{Sin}(2.0344+0-0)$$

$$= 54.2800$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = \frac{\partial}{\partial \delta_3}\begin{bmatrix} |V_2||V_1||Y_{21}|\mathrm{Cos}(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)+|V_2|^2|Y_{22}|\mathrm{Cos}(\theta_{22})+ \\ |V_2||V_3||Y_{23}|\mathrm{Cos}(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2) \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = \frac{\partial}{\partial \delta_3}|V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2)$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}|\mathrm{Sin}(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2)\frac{\partial}{\partial \delta_3}(\theta_{21}+\delta_3-\delta_2)$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}|\mathrm{Sin}(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2)$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = -|1.0||1.04||35.77709|\mathrm{Sin}(2.0344+0-0)$$

$$= -33.2800$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial|V_2|} = \frac{\partial}{\partial|V_2|}\begin{bmatrix}|V_2||V_1||Y_{21}|Cos(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)+|V_2|^2|Y_{22}|Cos(\theta_{22})+\\|V_2||V_3||Y_{23}|Cos(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2)\end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial|V_2|} = |V_1||Y_{21}|Cos(\theta_{21}+\delta_1-\delta_2)+2|V_2||Y_{22}|Cos(\theta_{22})+$$

$$|V_3||Y_{23}|Cos(\theta_{23}+\delta_3-\delta_2)$$

$$\frac{\partial P_2^{(0)}}{\partial|V_2|} = |1.05||22.36068|Cos(2.0344+0-0)+2|1.0||58.13777|Cos(-1.1071)+$$

$$|1.04||35.77709|Cos(2.0344+0-0)$$

$$= 24.8600$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial\delta_2} = \frac{\partial}{\partial\delta_2}\begin{bmatrix}|V_3||V_1||Y_{31}|Cos(\theta_{31}+\delta_1-\delta_3)+|V_3||V_2||Y_{32}|\\Cos(\theta_{32}+\delta_2-\delta_3)+|V_3|^2|Y_{33}|Cos(\theta_{33})\end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial\delta_2} = -|V_3||V_2||Y_{32}|Sin(\theta_{32}+\delta_2-\delta_3)$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial\delta_2} = -|1.04||1.0||35.77709|Sin(2.0344+0-0)$$

$$= -33.2800$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial\delta_3} = \frac{\partial}{\partial\delta_3}\begin{bmatrix}|V_3||V_1||Y_{31}|Cos(\theta_{31}+\delta_1-\delta_3)+|V_3||V_2||Y_{32}|\\Cos(\partial_{32}+\delta_2-\delta_3)+|V_3|^2|Y_{33}|Cos(\theta_{33})\end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial\delta_3} = |V_3||V_1||Y_{31}|Sin(\theta_{31}+\delta_1-\delta_3)+|V_3||V_2||Y_{32}|Sin(\theta_{32}+\delta_2-\delta_3)$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial\delta_3} = |1.04||1.05||31.62278|sin(1.8925+0-0)+|1.04||1.0||35.77709|$$

$$Sin(2.0344+0-0)$$

$$= 66.0400$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial|V_2|} = \frac{\partial}{\partial|V_2|}\begin{bmatrix}|V_3||V_1||Y_{31}|Cos(\theta_{31}+\delta_1-\delta_3)+|V_3||V_2||Y_{32}|\\Cos(\theta_{32}+\delta_2-\delta_3)+|V_3|^2|Y_{33}|Cos(\theta_{33})\end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial |V_2|} = |V_3||Y_{32}|\text{Sin}(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_3^{(0)}}{\partial |V_2|} = |1.04||35.77709|\text{Cos}(2.0344 + 0 - 0)$$

$$= -16.640$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_2} = \frac{\partial}{\partial \delta_2}\left[\begin{array}{l} -|V_2||V_1||Y_{21}|\text{Sin}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2||V_2||Y_{22}| \\ \text{Sin}(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) - |V_2||V_3||Y_{23}|\text{Sin}(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \end{array}\right]$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}|\text{Cos}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2||V_3||Y_{23}|\text{Cos}(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_2} = |1.0||1.05||22.36068|\text{Cos}(2.0344 + 0 - 0) + |1.0||1.04||35.77709|$$

$$\text{Cos}(2.0344 + 0 - 0)$$

$$= -27.1400$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = \frac{\partial}{\partial \delta_3}\left[\begin{array}{l} -|V_2||V_1||Y_{21}|\text{Sin}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2||V_2||Y_{22}| \\ \text{Sin}(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) - |V_2||V_3||Y_{23}|\text{Sin}(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \end{array}\right]$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}|\text{Cos}(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial \delta_3} = -|1.0||1.04||35.77709|\text{Cos}(2.0344 + 0 - 0)$$

$$= 16.6400$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial |V_2|} = \frac{\partial}{\partial |V_2|}\left[\begin{array}{l} -|V_2||V_1||Y_{21}|\text{Sin}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2||V_2||Y_{22}| \\ \text{Sin}(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) - |V_2||V_3||Y_{23}|\text{Sin}(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \end{array}\right]$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial |V_2|} = -|V_1||Y_{21}|\text{Sin}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - 2|V_2||Y_{22}|\text{Sin}(\theta_{22}) - |V_3||Y_{23}|$$

$$\text{Sin}(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$

$$\frac{\partial Q_2^{(0)}}{\partial |V_2|} = -|1.05||22.36068|\text{Sin}(2.0344+0-0) - 2|1.0||58.13777|\text{Sin}(-1.1071)$$

$$-|1.04||35.77709|\text{Sin}(2.0344+0-0)$$

$$= 49.7200$$

ในทำนองเดียวกัน จะหาสมาชิกทั้งหมดใน $[J]$

$$\left[J^{(0)}\right] = \begin{bmatrix} 54.2800 & -33.2800 & 24.8600 \\ -33.2800 & 66.0400 & -16.640 \\ -27.1400 & 16.6400 & 49.7200 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 6 สามารถหา $\Delta\delta_2^{(0)}, \Delta\delta_3^{(0)}$ และ $\Delta\left|V_2^{(0)}\right|$ จาก

$$\text{จาก} \quad \begin{bmatrix} \Delta P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} \end{bmatrix} = \left[J^{(k)}\right] \begin{bmatrix} \Delta\delta_i^{(k)} \\ \Delta V_i^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\text{จะได้} \quad \begin{bmatrix} \Delta\delta_i^{(k)} \\ \Delta\left|V_i^{(k)}\right| \end{bmatrix} = \left[J^{(k)}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} \end{bmatrix}$$

แทนค่าต่าง ๆ จะได้

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta\left|V_2^{(0)}\right| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 54.2800 & -33.2800 & 24.8600 \\ -33.2800 & 66.0400 & -16.640 \\ -27.1400 & 16.6400 & 49.7200 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -2.8600 \\ 1.4384 \\ -0.2200 \end{bmatrix}$$

การคำนวณ

$$\delta_2^{(0)} = \frac{\Delta\delta_2^{(0)}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} -2.8600 & -33.2800 & 24.8600 \\ 1.4384 & 66.0400 & -16.6400 \\ -0.2200 & 16.6400 & 49.7200 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 54.2800 & -33.2800 & 24.8600 \\ -33.2800 & 66.0400 & -16.6400 \\ -27.1400 & 16.6400 & 49.7200 \end{vmatrix}}$$

$$\delta_3^{(0)} = \frac{\Delta\delta_3^{(0)}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 54.2800 & -2.8600 & 24.8600 \\ -33.2800 & 1.4384 & -16.6400 \\ -27.1400 & -0.2200 & 49.7200 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 54.2800 & -33.2800 & 24.8600 \\ -33.2800 & 66.0400 & -16.6400 \\ -27.1400 & 16.6400 & 49.7200 \end{vmatrix}}$$

$$\left|V_2^{(0)}\right| = \frac{\Delta\left|V_2^{(0)}\right|}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 54.2800 & -33.2800 & -2.8600 \\ -33.2800 & 66.0400 & 1.4384 \\ -27.1400 & 16.6400 & -0.2200 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 54.2800 & -33.2800 & 24.8600 \\ -33.2800 & 66.0400 & -16.6400 \\ -27.1400 & 16.6400 & 49.7200 \end{vmatrix}}$$

จะได้ค่าต่าง ๆ เท่ากับ

$\Delta\delta_2^{(0)} = -0.045263$ $\Delta\delta_3^{(0)} = -0.007718$

$\Delta\left|V_2^{(0)}\right| = -0.026548$

ขั้นตอนที่ 7 จะได้ค่าต่าง ๆ จากการคำนวณในรอบที่ 1 ได้ผลการคำนวณดังนี้

$$\Delta_2^{(1)} = \Delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(0)} = 0 + (-0.045263) = -0.045263$$

$$\Delta_3^{(1)} = \Delta_3^{(0)} + \Delta\delta_3^{(0)} = 0 + (-0.007718) = -0.007718$$

$$\left|V_2^{(1)}\right| = \left|V_2^{(0)}\right| + \Delta\left|V_2^{(0)}\right| = 1 + (-0.026548) = 0.973450$$

__รอบที่ 2__

การคำนวณรอบที่ 2 นำค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 7 ไปแทนในสมการขั้นตอนที่ 3 เพื่อหาค่า $P_2^{(1)}, P_3^{(1)}$ และ $Q_2^{(1)}$

การหาค่า Pi และ Qi ในรอบที่ 2 กำหนดค่าเริ่มต้นของบัส 2 และบัส 3

บัส 1 $\left|V_1\right| = 1.05$ และ $\delta_1 = 0$

บัส 2 $\left|V_2^{(1)}\right| = 0.973450$ และ $\delta_2^{(1)} = -0.045263$

บัส 3 $\left|V_3\right| = 1.04$ และ $\delta_3^{(1)} = -0.007718$

$$P_2^{(1)} = \left|V_2^{(1)}\right|\left|V_1\right|\left|Y_{21}\right|\mathrm{Cos}\left(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2^{(1)}\right) + \left|V_2^{(1)}\right|^2\left|Y_{22}\right|\mathrm{Cos}\,\theta\left(\theta_{22}\right) +$$

$$\left|V_2^{(1)}\right|\left|V_3\right|\left|Y_{23}\right|\mathrm{Cos}\left(\theta_{23} + \delta_3^{(1)} - \delta_2^{(1)}\right)$$

$$= \left|0.97345\right|\left|1.05\right|\left|22.36068\right|\mathrm{Cos}\left(2.0344 + 0 - (-0.045263)\right) +$$

$$\left|0.97345\right|^2\left|58.13777\right|\mathrm{Cos}\left(-1.1071\right) +$$

$$\left|0.97345\right|\left|1.04\right|\left|35.77709\right|\mathrm{Cos}\left(2.0344 + (-0.007718) - (-0.045263)\right)$$

$$= -3.900782$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้

$P_3^{(1)} = 1.978285$ $\qquad$ $Q_2^{(1)} = -2.449086$

สามารถหา Power Residuals ที่บัสต่าง ๆ ได้เท่ากับ

$$\Delta P_2^{(1)} = P_2^{sch} - P_2^{(1)} = -4.0 - (-3.900782) = -0.099218$$

$$\Delta P_3^{(1)} = P_3^{sch} - P_3^{(1)} = 2.0 - (1.978285) = 0.021715$$

$$\Delta Q_2^{(1)} = Q_2^{sch} - Q_2^{(1)} = -2.5 - (-2.449086) = -0.050914$$

หาสมาชิกแต่ละตัวในเมทริกซ์จาโคเบียน $[J]$

$$\left[J^{(1)}\right] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_2^{(1)}}{\partial \delta_2} & \dfrac{\partial P_2^{(1)}}{\partial \delta_3} & \dfrac{\partial P_2^{(1)}}{\partial |V_2|} \\ \dfrac{\partial P_3^{(1)}}{\partial \delta_2} & \dfrac{\partial P_3^{(1)}}{\partial \delta_3} & \dfrac{\partial P_3^{(1)}}{\partial |V_2|} \\ \dfrac{\partial Q_2^{(1)}}{\partial \delta_2} & \dfrac{\partial Q_2^{(1)}}{\partial \delta_3} & \dfrac{\partial Q_2^{(1)}}{\partial |V_2|} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial P_2^{(1)}}{\partial \delta_2} = \left|V_2^{(1)}\right|\left|V_1\right|\left|Y_{21}\right| \mathrm{Sin}\left(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2^{(1)}\right) + \left|V_2^{(1)}\right|\left|V_3\right|\left|Y_{23}\right| \mathrm{Sin}\left(\theta_{23} + \delta_3^{(1)} - \delta_2^{(1)}\right)$$

$$= \left|0.97345\right|\left|1.05\right|\left|22.36068\right| \sin\left(2.0344 + 0 - \left(-0.045263\right)\right) +$$

$$\left|0.97345\right|\left|1.04\right|\left|35.77709\right| \sin\left(2.0344 + \left(-0.007718\right) - \left(-0.045263\right)\right)$$

$$= 51.724675$$

ในทำนองเดียวกัน จะหาสมาชิกทั้งหมดใน $\left[J\right]$ ได้เป็น

$$\left[J^{(1)}\right] = \begin{bmatrix} 51.724675 & -31.765618 & 21.302567 \\ -32.981642 & 65.656383 & -15.379086 \\ -28.538577 & 17.402838 & 48.103589 \end{bmatrix}$$

จะสามารถหา $\Delta\delta_2^{(1)}$, $\Delta\delta_3^{(1)}$ และ $\Delta\left|V_2^{(1)}\right|$ จาก

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(1)} \\ \Delta\delta_3^{(1)} \\ \Delta\left|V_2^{(1)}\right| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 51.724675 & -31.765618 & 21.302567 \\ -32.981642 & 65.656383 & -15.379086 \\ -28.538577 & 17.402838 & 48.103589 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0.099218 \\ 0.021715 \\ -0.050914 \end{bmatrix}$$

การคำนวณ

$$\delta_2^{(1)} = \frac{\Delta\delta_2^{(1)}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} -0.099218 & -31.765618 & 21.302567 \\ 0.021715 & 65.656383 & -15.379086 \\ -0.050914 & 17.402838 & 48.103589 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 51.724675 & -31.765618 & 21.302567 \\ -32.981642 & 65.656383 & -15.379086 \\ -28.53877 & 17.402838 & 48.103589 \end{vmatrix}}$$

$$\delta_3^{(1)} = \frac{\Delta\delta_3^{(1)}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 51.724675 & -0.099218 & 21.302567 \\ -32.981642 & 0.021715 & -15.379086 \\ -28.53877 & -0.050914 & 48.103589 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 51.724675 & -31.765618 & 21.302567 \\ -32.981642 & 65.656383 & -15.379086 \\ -28.53877 & 17.402838 & 48.103589 \end{vmatrix}}$$

$$\left|V_2^{(1)}\right| = \frac{\Delta\left|V_2^{(1)}\right|}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 51.724675 & -31.765618 & -0.099218 \\ -32.981642 & 65.656383 & 0.021715 \\ -28.53877 & 17.402838 & -0.050914 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 51.724675 & -31.765618 & 21.302567 \\ -32.981642 & 65.656383 & -15.379086 \\ -28.53877 & 17.402838 & 48.103589 \end{vmatrix}}$$

$$\Delta\delta_2^{(1)} = -\ 0.001795 \qquad \Delta\delta_3^{(1)} = -\ 0.000985$$

$$\Delta\left|V_2^{(1)}\right| = -\ 0.001767$$

จะได้ค่าต่าง ๆ จากสมการ ในการคำนวณรอบที่ 2 ได้ผลการคำนวณดังนี้

$$\delta_2^{(2)} = \delta_2^{(1)} + \Delta\delta_2^{(1)} = (-0.045263) + (-0.001795)$$

$$= -0.047058$$

$$\delta_3^{(2)} = \delta_3^{(1)} + \Delta\delta_3^{(1)} = (-0.007718) + (-0.000985)$$

$$= -0.00870$$

$$\left|V_2^{(2)}\right| = \left|V_2^{(1)}\right| + \Delta\left|V_2^{(1)}\right| = (0.973451) + (-0.001767)$$

$$= 0.971684$$

<u>รอบที่ 3</u>

สำหรับการคำนวณในรอบที่ 3 ได้ผลการคำนวณดังนี้

$$\begin{bmatrix} -0.000216 \\ 0.000038 \\ -0.000143 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 51.5967 & -31.6938 & 21.1474 \\ -32.9338 & 65.5975 & -15.3516 \\ -28.5482 & 17.3969 & 47.9548 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(2)} \\ \Delta\delta_3^{(2)} \\ \Delta\left|V_2^{(2)}\right| \end{bmatrix}$$

$$\delta_2^{(2)} = \frac{\Delta\delta_2^{(2)}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} -0.000216 & -31.6938 & 21.1474 \\ 0.000038 & 65.5975 & -15.3516 \\ -0.000143 & 17.3969 & 48.9548 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 51.5967 & -31.6938 & 21.1474 \\ -32.9338 & 65.5975 & -15.3516 \\ -28.5482 & 17.3969 & 48.9548 \end{vmatrix}}$$

$$\delta_3^{(2)} = \frac{\Delta\delta_3^{(2)}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 51.5967 & -0.000216 & 21.1474 \\ -32.9338 & 0.000038 & -15.3516 \\ -28.5482 & -0.000143 & 48.9548 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 51.5967 & -31.6938 & 21.1474 \\ -32.9338 & 65.5975 & -15.3516 \\ -28.5482 & 17.3969 & 48.9548 \end{vmatrix}}$$

$$\left|V_2^{(2)}\right| = \frac{\Delta\left|V_2^{(2)}\right|}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 51.5967 & -31.6938 & -0.000216 \\ -32.9338 & 65.5975 & 0.000038 \\ -28.5482 & 17.3969 & -0.000143 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 51.5967 & -31.6938 & 21.1474 \\ -32.9338 & 65.5975 & -15.3516 \\ -28.5482 & 17.3969 & 48.9548 \end{vmatrix}}$$

$$\Delta\delta_2^{(2)} = -0.000038 \qquad \Delta\left|V_2^{(2)}\right| = -0.0000044$$

$$\Delta\delta_3^{(2)} = -0.0000024$$

และ

$$\delta_2^{(3)} = (-0.047058) + (-0.0000038) = -0.047060$$

$$\delta_3^{(3)} = (-0.008703) + (-0.0000024) = -0.008705$$

$$\left|V_2^{(3)}\right| = (0.971684) + (-0.0000044) = 0.971680$$

แปลงมุมในหน่วยเรเดียนเป็นองศา

$$\delta_2^{(3)} = -0.047060 \times \left(\frac{360}{2\pi}\right) = -2.696$$

$$\delta_3^{(3)} = -0.008705 \times \left(\frac{360}{2\pi}\right) = -0.499$$

พบว่า ผลต่างกำลังไฟฟ้า $< 2.5 \times 10^{-4}$ คำตอบผ่านแล้ว

จะได้ $V_2 = 0.972\angle -2.696^{\circ}$ $V_3 = 1.04\angle -0.499^{\circ}$

2.11 โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

2.11.1 Power World Program

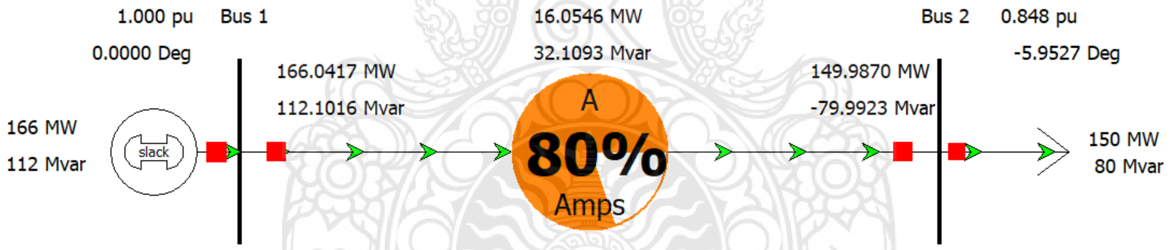
เมื่อระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ได้รับการปรับปรุงสำหรับการฝึกอบรมวิศวกรระบบไฟฟ้า [12] โปรแกรมนี้เป็นซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ในแอพพลิเคชั่นระบบไฟฟ้าที่ผสมผสานกับเทคนิคการคำนวณ การจำลองนี้ใช้สำหรับการคาดการณ์การขัดข้องของระบบไฟฟ้า แอปพลิเคชันจะทำการจำลองการไหลของพลังงานที่เหมาะสมและนำเสนอแอนิเมชันของระบบไฟฟ้าซอฟต์แวร์นี้ได้รับ

ความนิยมมากกว่าเครื่องมือจำลองอื่น เนื่องจากความสามารถในการแสดงภาพเคลื่อนไหวของกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและพารามิเตอร์อื่น แบบเรียลไทม์ด้วยแอนิเมชั่นผู้ใช้สามารถจินตนาการถึงสภาพจริงว่าเกิดอะไรขึ้นภายในระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อน นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ยังมีประสิทธิภาพและ เชื่อถือได้มากในการวิเคราะห์การไหลของโหลด การศึกษาข้อผิดพลาดรวมถึงการเลือกเบรกเกอร์วงจร สภาพของบัสและการเดินสายภายในระบบที่ซับซ้อนมาก [13] โปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 2-16

PowerWorld Corporation

รูปที่ 2-16 โปรแกรม Power World

โปรแกรม Power World สามารถเริ่มทำงานได้ต้องสร้างบัส 2 บัสโดยใช้สัญลักษณ์กราฟิกเป็นตัวแทนของอุปกรณ์ระบบ [14] โปรแกรมสามารถแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เสมือนจริง แรงดันขนาดของมุม กำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยที่สามารถที่จะเรียกดูกำลังไฟฟ้าที่ต้นทางกำลังไฟฟ้าปลายทาง กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของสายส่งขณะที่โปรแกรมทำการจำลองอยู่ ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม Power World

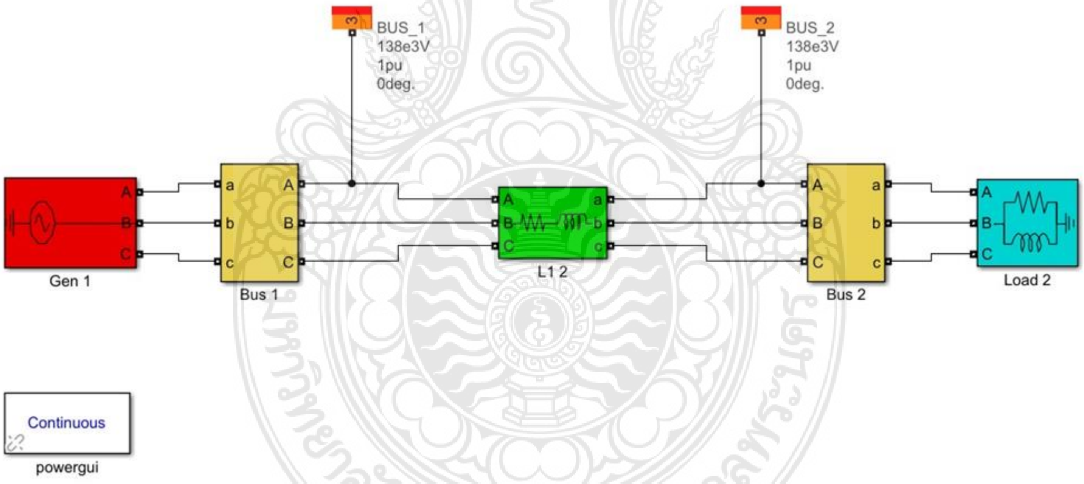
2.11.2 MATLAB Program

MATLAB คือ โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีสิ่งแวดล้อมในการคำนวณของตัวเอง (Numerical Computing Environment) และมีภาษาเฉพาะตัวในการเขียนโปรแกรมได้ โดย MATLAB มาจากคำ 2 คำรวมกันคือ Matrix และ Laboratory ซึ่งหมายถึงห้องปฏิบัติการ โปรแกรม MATLAB มีความง่ายและเร็วกว่าภาษาอื่น เพราะมีไลบรารีจำนวนมากรองรับ และด้วยตัวลักษณะการทำงานเชิงเมทริกซ์ ทำให้เราสามารถจัดการกับอาเรย์ได้ง่ายดาย โค้ดโปรแกรมสั้นกะทัดรัด หมาะกับการสร้างและทดสอบระเบียบวิธีใหม่ๆ รองรับการทำงานกับกราฟิก รวมถึง GUI (Graphic User Interface) ทำให้สะดวกในการป้อนค่าและแสดงผล นอกจากนั้น ยังสามารถติดต่อกับฮาร์ดแวร์และโปรแกรมภาษาอื่นได้ โปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 2-18 [15]

รูปที่ 2-18 โปรแกรม MATLAB

2.11.3 MATLAB SIMULINK Program

SIMULINK เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานอยู่บน MATLAB ใช้ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยรูปภาพ สนับสนุนเครื่องมือสร้างแบบจำลอง การเลียนแบบ และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล สามารถทำแบบจำลองด้วยรูปภาพได้อย่างรวดเร็ว SIMULINK ยังประกอบด้วยไลบรารีบล็อกพื้นฐานและขั้นสูงเฉพาะสาขาวิชาทั้งระบบเชิงเส้น (Linear System) ระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear System) ระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous-Time) ระบบที่เวลาแบบแซมปิ้ง (Sample Time) ระบบไฮบริด (Hybrid) SIMULINK สนับสนุนการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้ขณะที่กำลังเลียนแบบระบบอยู่ ทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ทันที ว่าอะไร ที่ไหน อย่างไร กับแบบจำลอง สุดท้าย SIMULINK สามารถเชื่อมต่อข้อมูลกับ MATLAB ได้โดยตรง ทำให้สามารถเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ภายนอกได้ ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม MATLAB SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 2-19



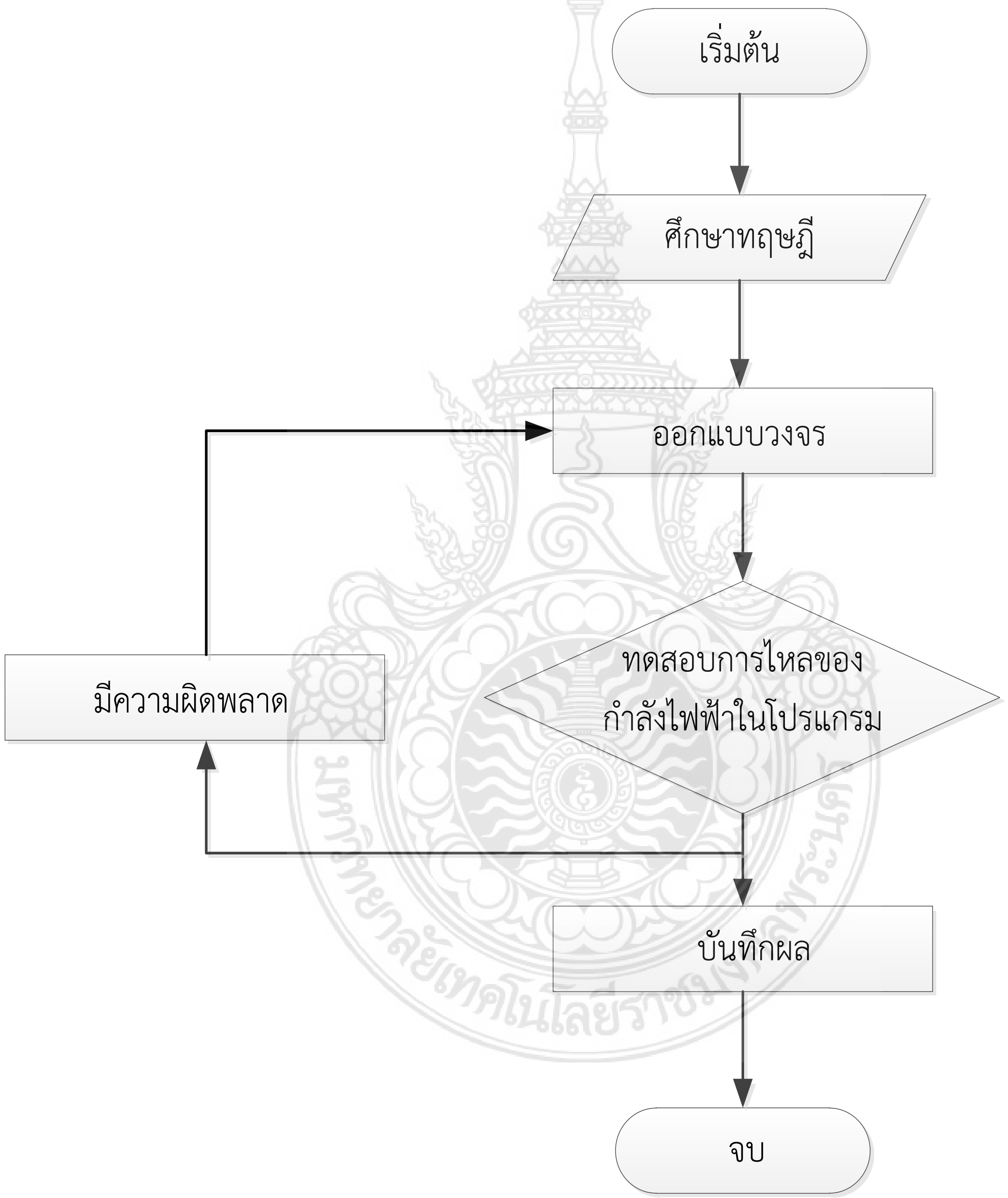
รูปที่ 2-19 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม MATLAB SIMULINK

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ผังการผลิตและกรรมวิธีการผลิต

ในการจัดทำโครงงานแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านี้ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์มีวิธีดำเนินงานปริญญานิพนธ์ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ผังการผลิตและกรรมวิธีการผลิต

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความเป็นมาและสาเหตุของปัญหา
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. วางแผนปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า
4. ออกแบบวงจรระบบไฟฟ้า
5. เขียนวงจรระบบไฟฟ้าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในโปรแกรมและหาข้อบกพร่อง
7. แก้ไขข้อบกพร่อง
8. จัดทำรูปเล่มรายงาน

3.3 การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง

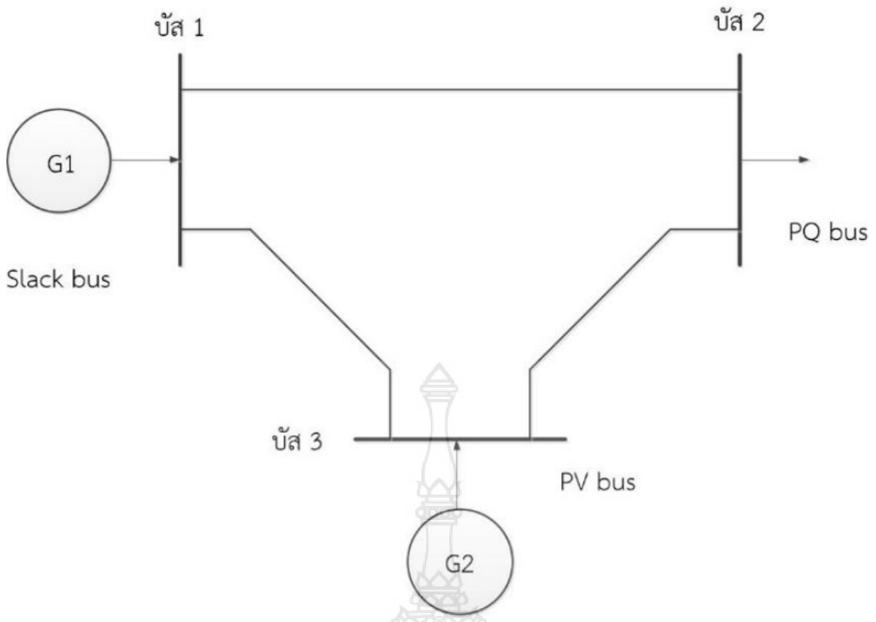
ในโครงงานนี้มีการประมวลผลเทคนิคที่นำเสนอด้วยโปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK โดยจะทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยทดสอบในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 5 บัส และ 30 บัส โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษาดังนี้

1. กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการปกติ
2. กรณีตัดวงจรสายส่ง
3. กรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

3.4 แบบวงจรระบบไฟฟ้ากำลัง

1. แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

ประกอบด้วย 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 1 โหลด แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ดังแสดงในรูปที่ 3-2, ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ดังแสดงในตารางที่ 3-1, ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ดังแสดงในตารางที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

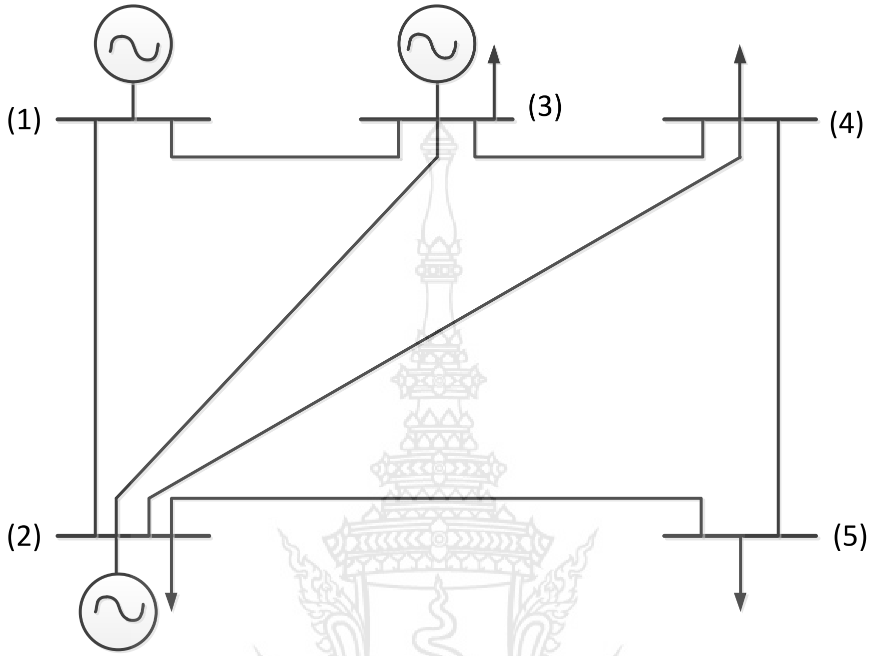
Line	from	to	R (pu.)	X (pu.)
1	1	2	0.02	0.04
2	1	3	0.01	0.03
3	2	3	0.0125	0.025

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.05	0	0	0	0	0	0
2	1.00	0	400	250	0	0	0
3	1.04	0	0	0	200	0	0
	Total		400	250	200	0	0

2. แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

ประกอบด้วย 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 4 โหลด แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ดังแสดงในรูปที่ 3-3, ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ดังแสดงในตารางที่ 3-3, ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ดังแสดงในตารางที่ 3-4



รูปที่ 3-3 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

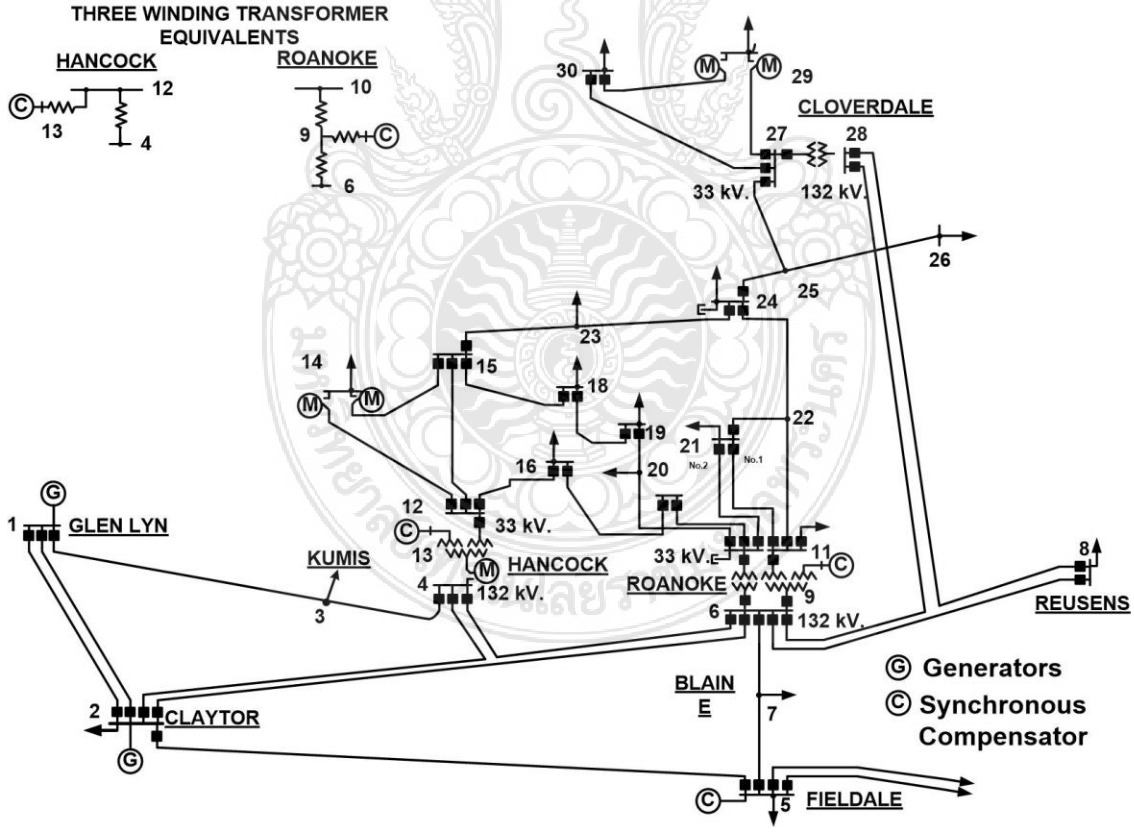
Line	from	to	R (pu.)	X (pu.)
1	1	2	0.02	0.06
2	1	3	0.08	0.24
3	2	3	0.06	0.18
4	2	4	0.06	0.18
5	2	5	0.04	0.12
6	3	4	0.01	0.03
7	4	5	0.08	0.24

ตารางที่ 3-4 ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.050	0	0	0	0	0	0
2	1.045	0	20	10	40	0	0
3	1.030	0	20	15	30	0	0
4	1.000	0	50	30	0	0	0
5	1.000	0	60	40	0	0	0
	Total		150	95	70	0	0

3. แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

ประกอบด้วย 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, 4 ตัวชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ, 2 Capacitor และ 21 โหลด แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ดังแสดงในรูปที่ 3-4, ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ดังแสดงในตารางที่ 3-5, ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ดังแสดงในตารางที่ 3-6



รูปที่ 3-4 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

ตารางที่ 3-5 ข้อมูลสายส่งแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

Line	from	to	R (pu.)	X (pu.)	B/2 (pu.)	Tap Ratio
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264	1
2	1	3	0.0452	0.1652	0.0204	1
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0184	1
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042	1
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209	1
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187	1
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045	1
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0102	1
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0085	1
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0045	1
11	6	9	0.0	0.2080	0.0	0.978
12	6	10	0.0	0.5560	0.0	0.969
13	9	11	0.0	0.2080	0.0	1
14	9	10	0.0	0.1100	0.0	1
15	4	12	0.0	0.2560	0.0	0.932
16	12	13	0.0	0.1400	0.0	1
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0	1
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0	1
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0	1
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0	1
21	16	17	0.0824	0.1923	0.0	1
22	15	18	0.1073	0.2185	0.0	1
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0	1
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0	1
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0	1
26	10	17	0.0324	0.0845	0.0	1
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0	1
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0	1
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0	1
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0	1
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0	1
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0	1
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0	1
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0	1

LIne	from	to	R (pu.)	X (pu.)	B/2 (pu.)	Tap Ratio
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0	1
36	28	27	0.0	0.3960	0.0	0.968
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0	1
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0	1
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0	1
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0214	1
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0650	1

ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส จะทำการปรับแท๊ปหม้อแปลง 4 ที่ ได้แก่ หม้อแปลงระหว่างสายที่ 6 และ 9, 6 และ 10, 4 และ 12, 28 และ 27

ตารางที่ 3-6 ข้อมูลบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.060	0	0	0	0	0	0
2	1.043	0	21.7	12.7	40	0	0
3	1.000	0	2.4	1.2	0	0	0
4	1.060	0	7.6	1.6	0	0	0
5	1.010	0	94.2	19.0	0	0	0
6	1.000	0	0	0	0	0	0
7	1.000	0	22.8	10.9	0	0	0
8	1.010	0	30.0	30.0	0	0	0
9	1.000	0	0	0	0	0	0
10	1.000	0	5.8	2.0	0	0	19.0
11	1.082	0	0	0	0	0	0
12	1.000	0	11.2	7.5	0	0	0
13	1.071	0	0	0	0	0	0
14	1.000	0	6.2	1.6	0	0	0
15	1.000	0	8.2	2.5	0	0	0
16	1.000	0	3.5	1.8	0	0	0
17	1.000	0	9.0	5.8	0	0	0
18	1.000	0	3.2	0.9	0	0	0
19	1.000	0	9.5	3.4	0	0	0
20	1.000	0	2.2	0.7	0	0	0
21	1.000	0	17.5	11.2	0	0	0
22	1.000	0	0	0	0	0	0
23	1.000	0	3.2	1.6	0	0	0
24	1.000	0	8.7	6.7	0	0	4.3
25	1.000	0	0	0	0	0	0
26	1.000	0	3.5	2.3	0	0	0
27	1.000	0	0	0	0	0	0
28	1.000	0	0	0	0	0	0
29	1.000	0	2.4	0.9	0	0	0
30	1.000	0	10.6	1.9	0	0	0
	Total		283.4	126.2	40	0	23.3

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการทดสอบ

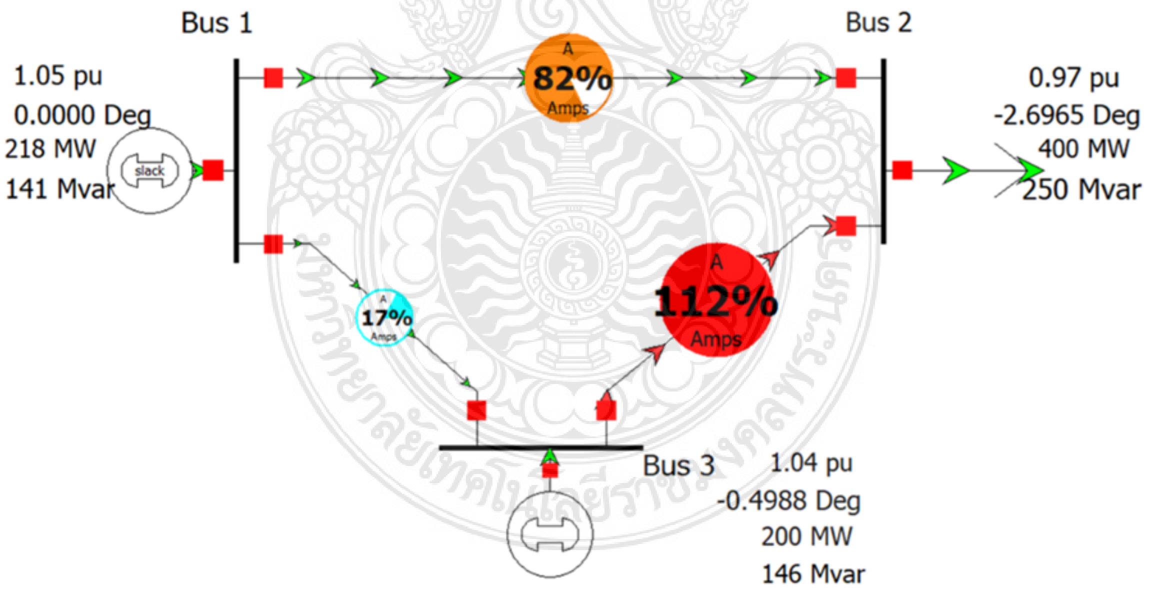
การทดสอบศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในบทความนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK และ Power World ในการประมวลผล โดยจะทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 5 บัส และ 30 บัส โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา ได้แก่

- กรณีศึกษาที่ 1 กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ
- กรณีศึกษาที่ 2 ตัดวงจรสายส่ง
- กรณีศึกษาที่ 3 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

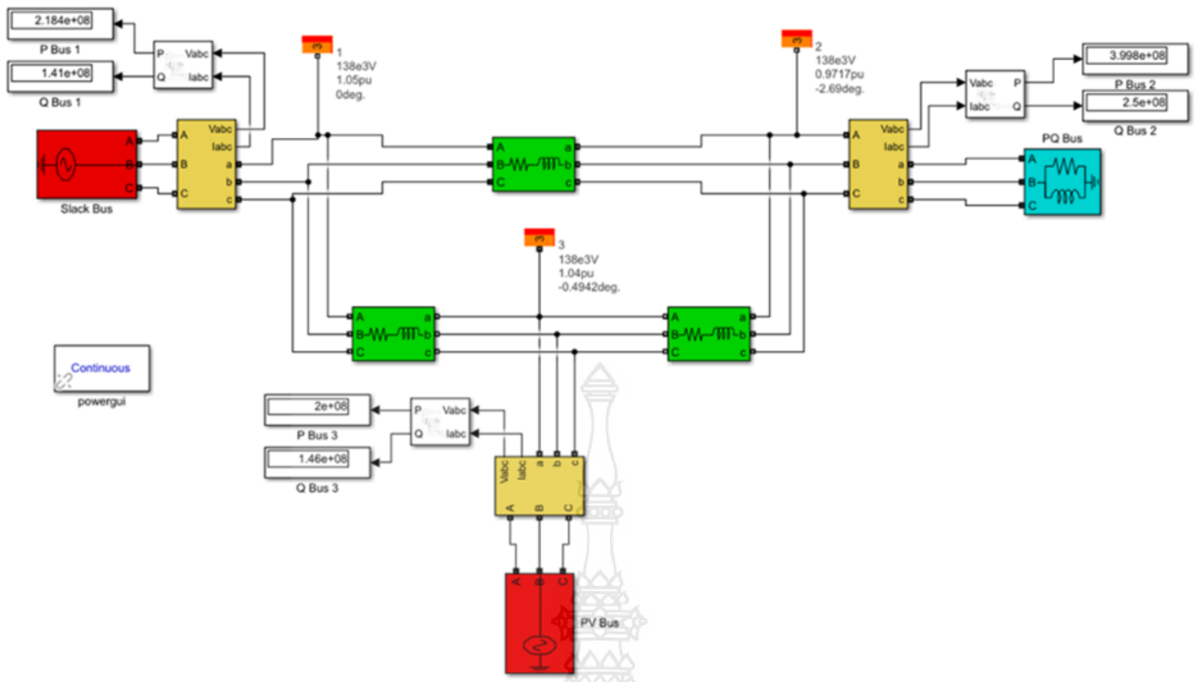
4.1 กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ

4.1.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 3 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 4-1, การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 3 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 3 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม Power World

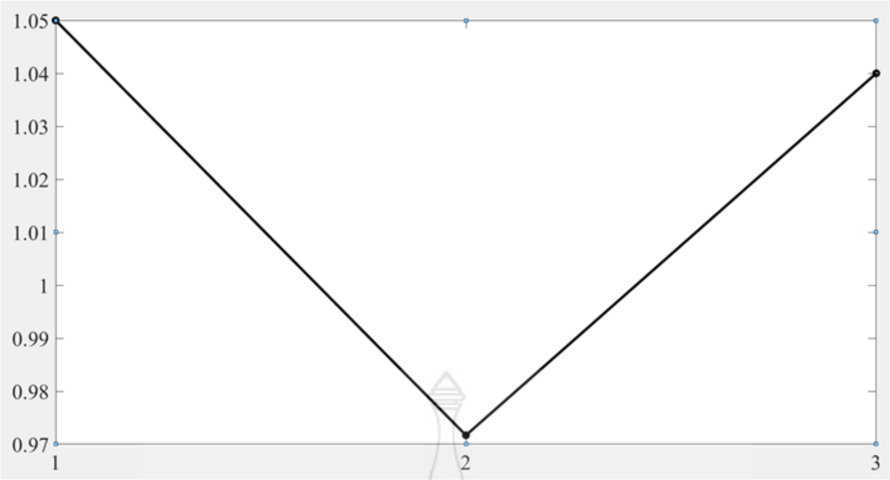


รูปที่ 4-2 การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 3 บัสในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

ในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติเป็นกรณีพื้นฐานเพื่อที่จะนำผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีอื่นมาเปรียบเทียบ ผลการทดสอบในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ดังแสดงในตารางที่ 4-1, แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัสกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4-3

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

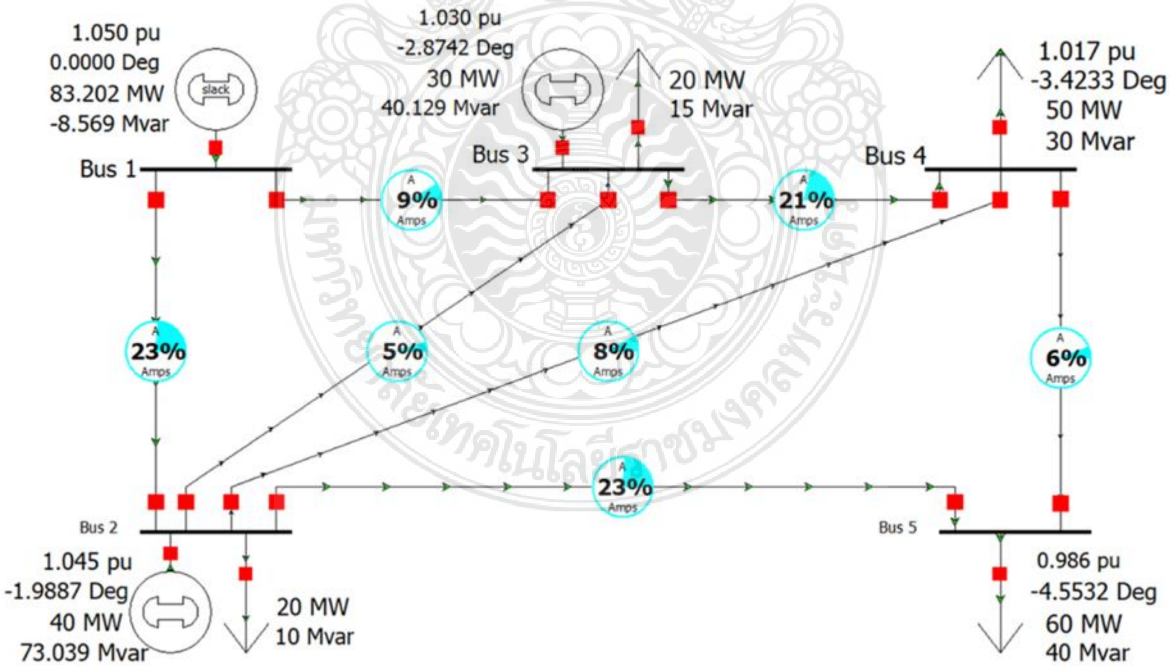
Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.05	0	0	0	218	141	0
2	0.97	-2.6965	400	250	0	0	0
3	1.04	-0.4988	0	0	200	146	0
	Total		400	250	418	287	0



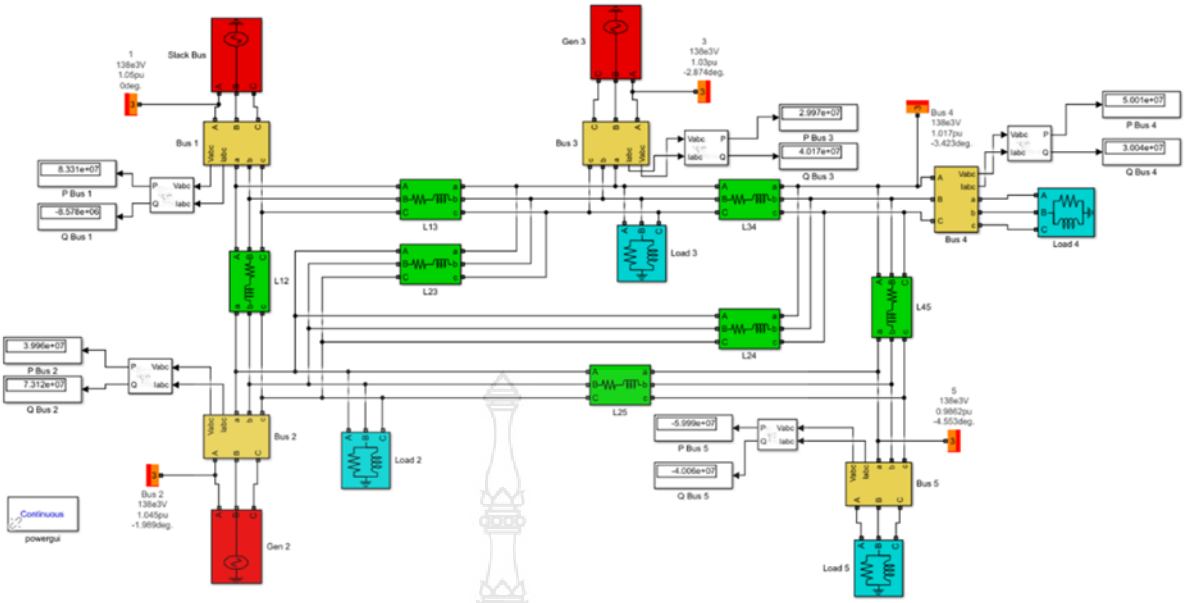
รูปที่ 4-3 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ

4.1.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 5 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 4-4, การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 5 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-4 การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 5 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม Power World

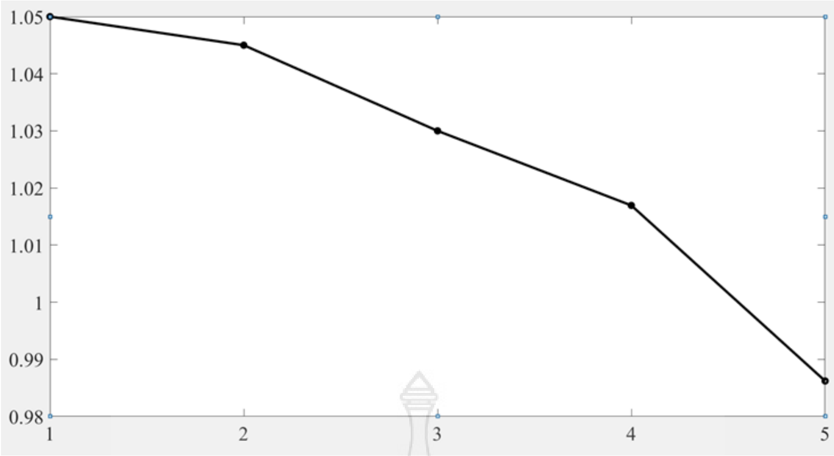


รูปที่ 4-5 การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 5 บัส ในสภาวการณ์ปกติด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

ในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติเป็นกรณีพื้นฐานเพื่อที่จะนำผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีอื่นมาเปรียบเทียบ ผลการทดสอบในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ดังแสดงในตารางที่ 4-2, แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัสกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4-6

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.050	0	0	0	83.202	-8.569	0
2	1.045	-1.9887	20	10	40	73.039	0
3	1.030	-2.8742	20	15	30	40.129	0
4	1.017	-3.4233	50	30	0	0	0
5	0.986	-4.5532	60	40	0	0	0
	Total		150	95	153.202	104.599	0



รูปที่ 4-6 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ

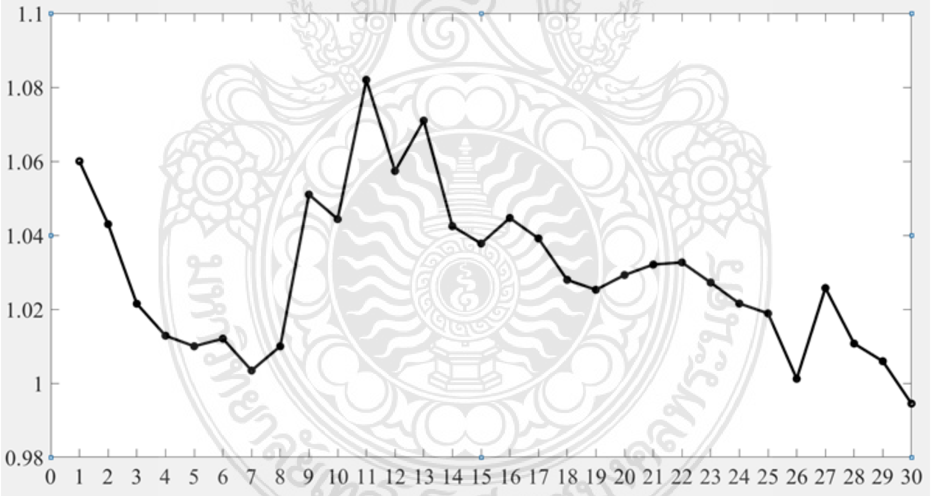
4.1.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการทดสอบ ผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 30 บัส ในสภาวะการปกติด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในตารางที่ 4-3, แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้า 30 บัสกำลังกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4-7

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลอง 30 บัส ในสภาวะการปกติด้วยโปรแกรม MATLAB

Bus	V (pu.)	δ (Degree)	Load P(MW)	Load Q(MVAr)	Generator P(MW)	Generator Q(MVAr)	Injected (Mvar)
1	1.060	0	0	0	260.998	-17.021	0
2	1.043	-5.497	21.7	12.7	40	48.822	0
3	1.022	-8.004	2.4	1.2	0	0	0
4	1.013	-9.661	7.6	1.6	0	0	0
5	1.010	-14.381	94.2	19.0	0	35.975	0
6	1.012	-11.398	0	0	0	0	0
7	1.003	-13.150	22.8	10.9	0	0	0
8	1.010	-12.115	30.0	30.0	0	30.826	0
9	1.051	-14.434	0	0	0	0	0
10	1.044	-16.024	5.8	2.0	0	0	19.0
11	1.082	-14.434	0	0	0	16.119	0
12	1.057	-15.302	11.2	7.5	0	0	0
13	1.071	-15.302	0	0	0	10.423	0
14	1.042	-16.191	6.2	1.6	0	0	0
15	1.038	-16.278	8.2	2.5	0	0	0

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
16	1.045	-15.880	3.5	1.8	0	0	0
17	1.039	-16.118	9.0	5.8	0	0	0
18	1.028	-16.884	3.2	0.9	0	0	0
19	1.025	-17.052	9.5	3.4	0	0	0
20	1.029	-16.852	2.2	0.7	0	0	0
21	1.032	-16.468	17.5	11.2	0	0	0
22	1.033	-16.455	0	0	0	0	0
23	1.027	-16.662	3.2	1.6	0	0	0
24	1.022	-16.830	8.7	6.7	0	0	4.3
25	1.019	-16.424	0	0	0	0	0
26	1.001	-16.842	3.5	2.3	0	0	0
27	1.026	-15.912	0	0	0	0	0
28	1.011	-12.057	0	0	0	0	0
29	1.006	-17.136	2.4	0.9	0	0	0
30	0.995	-18.015	10.6	1.9	0	0	0
	Total		283.4	126.2	300.998	125.144	23.3



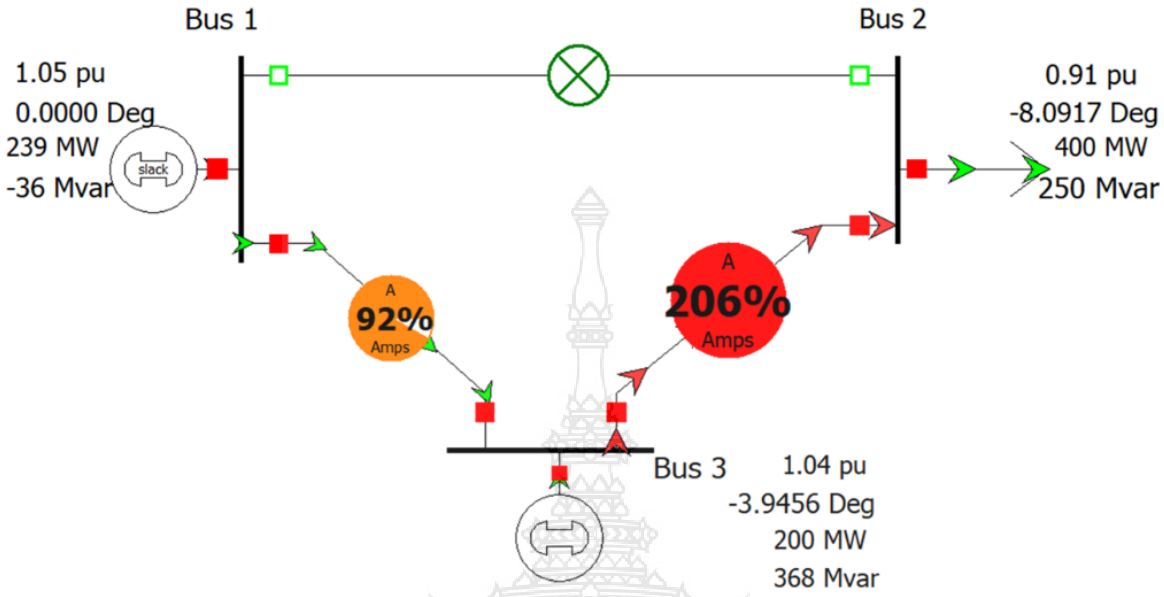
รูปที่ 4-7 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวการณ์ปกติ

4.2 กรณีปลดวงจรสายส่ง

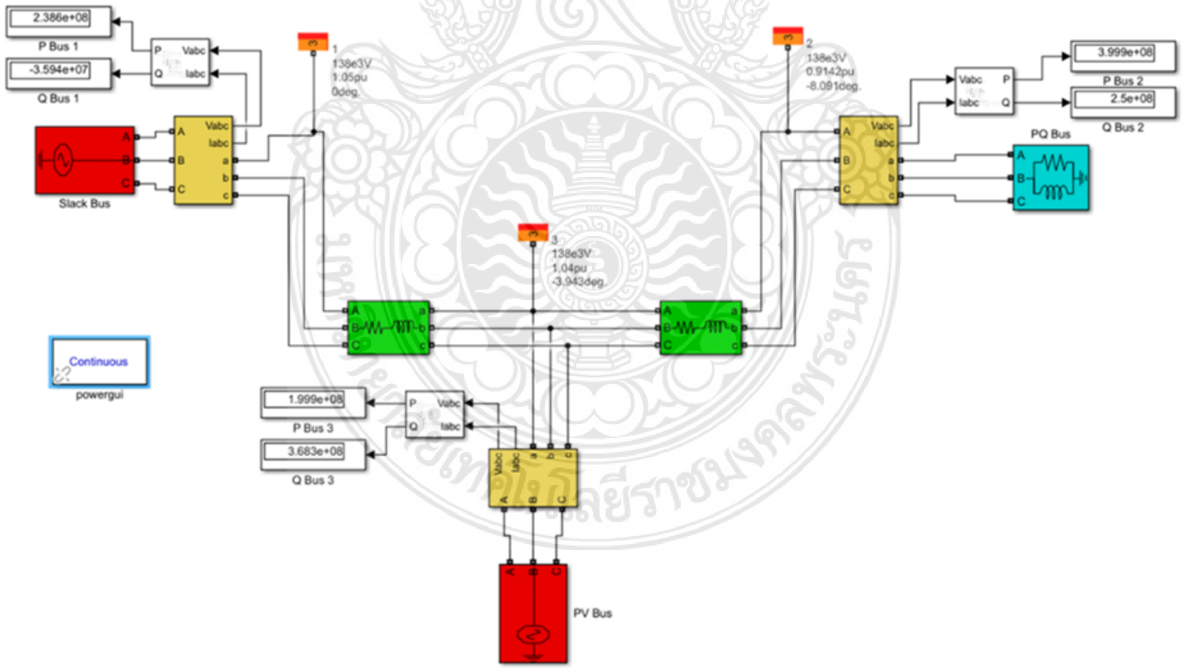
4.2.1 ปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK 1 การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2

ด้วยโปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 4-8, การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-8 การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ด้วยโปรแกรม Power World



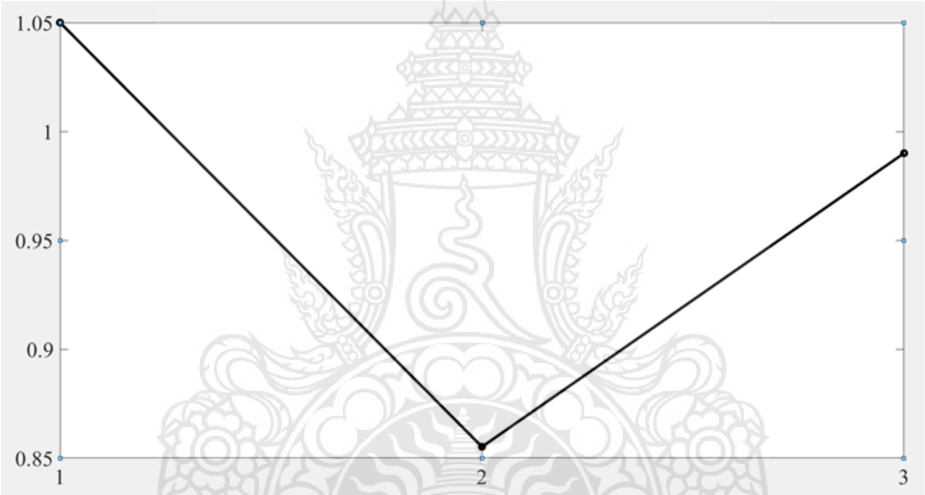
รูปที่ 4-9 การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

เมื่อทำการปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 3 มีค่าลดลงทำให้เกิดการสูญเสียในระบบไฟฟ้า ผลการทดสอบกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ในแบบจำลองระบบ

ไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ดังแสดงในตารางที่ 4-4, แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัสกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4-10

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบในกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

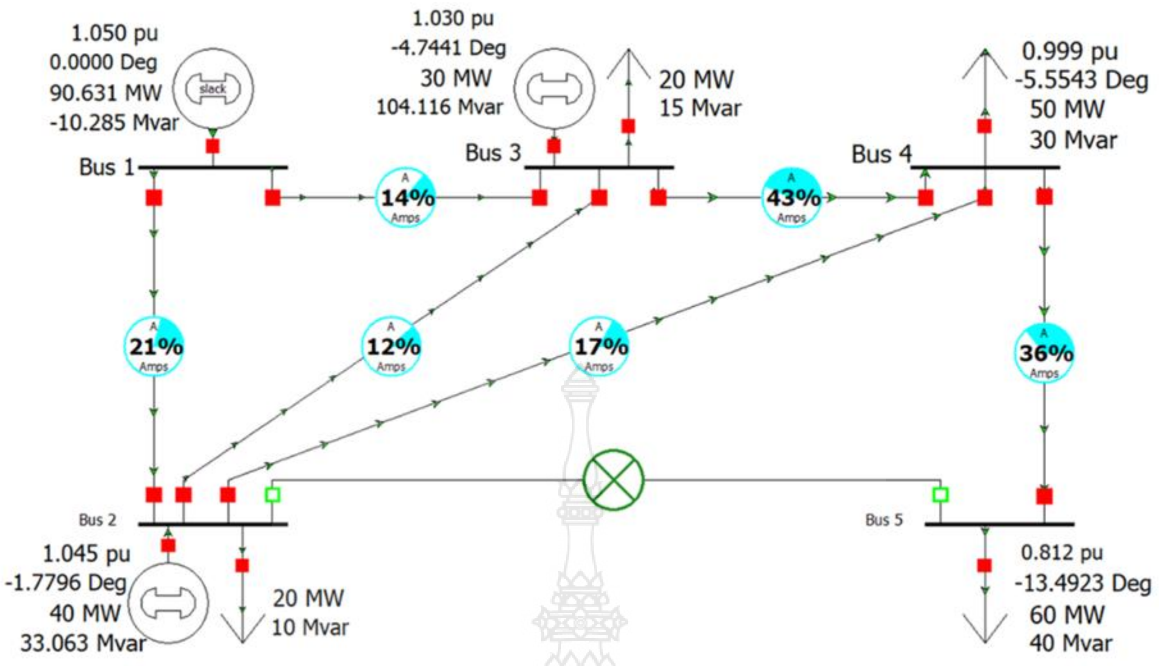
Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.05	0	0	0	239	-36	0
2	0.91	-8.0917	400	250	0	0	0
3	1.04	-3.9456	0	0	200	368	0
	Total		400	250	439	332	0



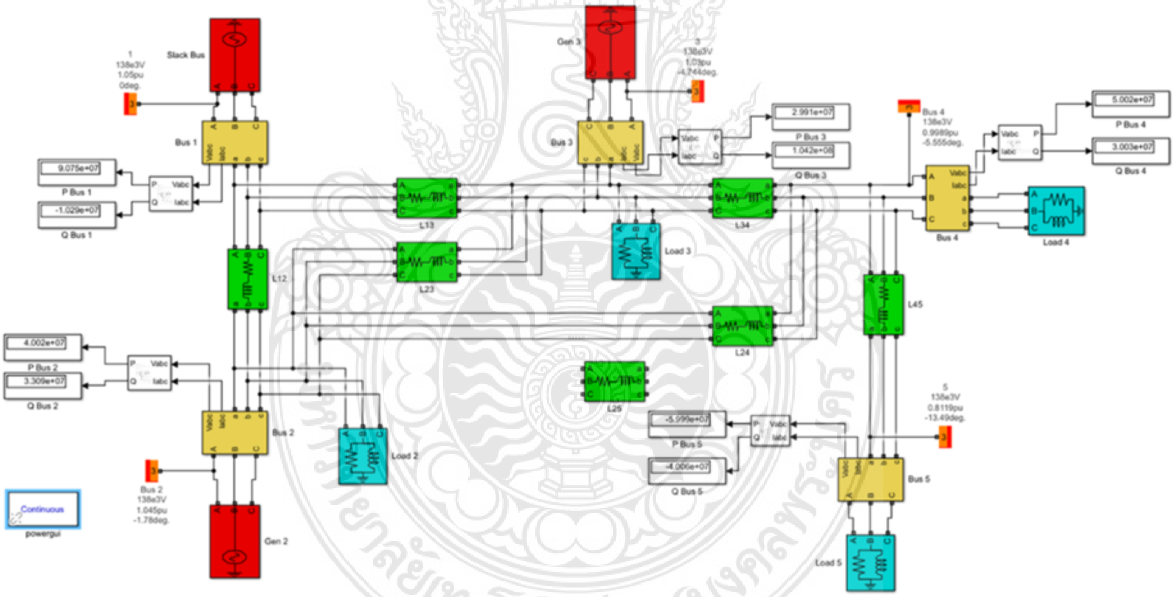
รูปที่ 4-10 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัสกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่1และ2

4.2.2 ปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ด้วยโปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 4-11, การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-11 การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ด้วยโปรแกรม Power World



รูปที่ 4-12 การไหลกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

เมื่อทำการปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 5 มีค่าลดลงส่งผลให้เกิดการสูญเสียในระบบไฟฟ้า ผลการทดสอบกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ดังแสดงในตารางที่ 4-5, แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส กรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4-13

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ 5 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.050	0	0	0	90.631	-10.285	0
2	1.045	-1.7796	20	10	40	33.063	0
3	1.030	-4.7441	20	15	30	104.116	0
4	0.999	-5.5543	50	30	0	0	0
5	0.812	-13.4923	60	40	0	0	0
	Total		150	95	160.631	126.894	0

รูปที่ 4-13 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัสกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่2และ5

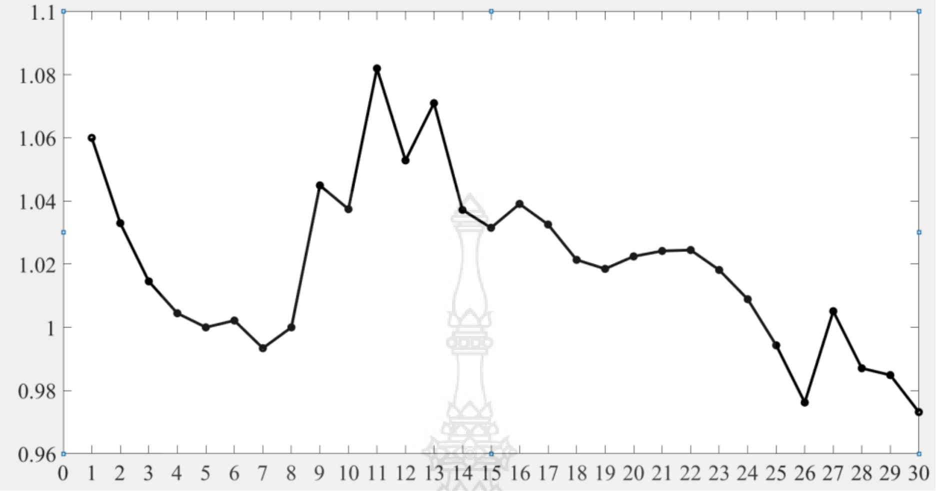
4.2.3 ปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 25และ27, 6และ28 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการทดสอบ ผลการทดสอบกรณีตัดวงจรสายส่งระหว่างบัส 25 และ 27, 6 และ 28 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบกรณีตัดวงจรสายส่งระหว่างบัส 25 และ 27, 6 และ 28 ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ด้วยโปรแกรม MATLAB

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.060	0	0	0	261.516	4.746	0
2	1.033	-5.372	21.7	12.7	40	29.573	0
3	1.015	-8.010	2.4	1.2	0	0	0
4	1.004	-9.674	7.6	1.6	0	0	0
5	1.000	-14.433	94.2	19.0	0	36.328	0
6	1.002	-11.382	0	0	0	0	0
7	0.993	-13.171	22.8	10.9	0	0	0
8	1.000	-12.477	30.0	30.0	0	37.486	0
9	1.045	-14.686	0	0	0	0	0
10	1.037	-16.412	5.8	2.0	0	0	19.0
11	1.082	-14.686	0	0	0	19.273	0
12	1.053	-15.649	11.2	7.5	0	0	0
13	1.071	-15.649	0	0	0	13.864	0
14	1.037	-16.588	6.2	1.6	0	0	0
15	1.032	-16.703	8.2	2.5	0	0	0
16	1.039	-16.245	3.5	1.8	0	0	0
17	1.033	-16.571	9.0	5.8	0	0	0
18	1.021	-17.304	3.2	0.9	0	0	0
19	1.019	-17.468	9.5	3.4	0	0	0
20	1.022	-17.262	2.2	0.7	0	0	0
21	1.024	-16.938	17.5	11.2	0	0	0
22	1.024	-16.948	0	0	0	0	0
23	1.018	-17.248	3.2	1.6	0	0	0
24	1.009	-17.633	8.7	6.7	0	0	4.3
25	0.994	-18.045	0	0	0	0	0
26	0.976	-18.484	3.5	2.3	0	0	0
27	1.005	-16.891	0	0	0	0	0
28	0.987	-13.946	0	0	0	0	0
29	0.985	-18.166	2.4	0.9	0	0	0
30	0.973	-19.083	10.6	1.9	0	0	0
Total			283.4	126.2	301.516	141.27	23.3

เมื่อทำการปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 25 และ 27, 6 และ 28 ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 7, 25, 26, 28, 29 และ 30 มีแรงดันลดลงส่งผลให้เกิดการสูญเสียในระบบไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสกรณีปลดวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 25 และ 27, 6 และ 28 ดังแสดงในรูปที่ 4-14

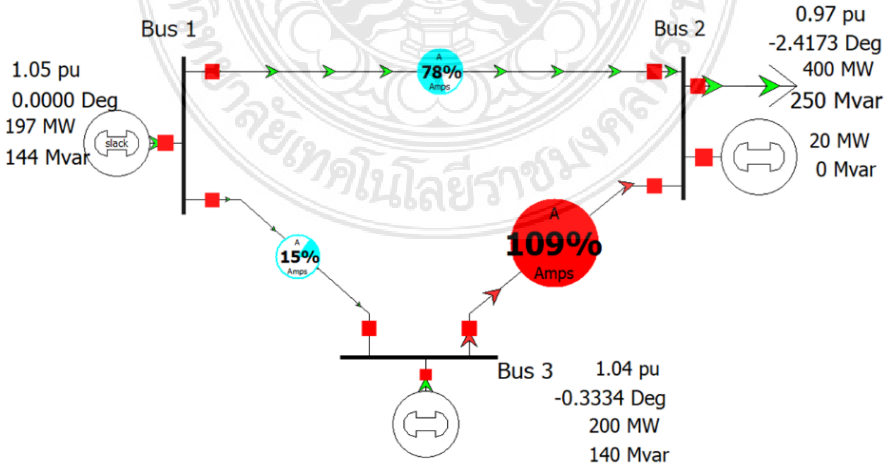


รูปที่ 4-14 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสกรณีตัดวงจรสายส่งระหว่างบัส 25 และ 27, 6 และ 28

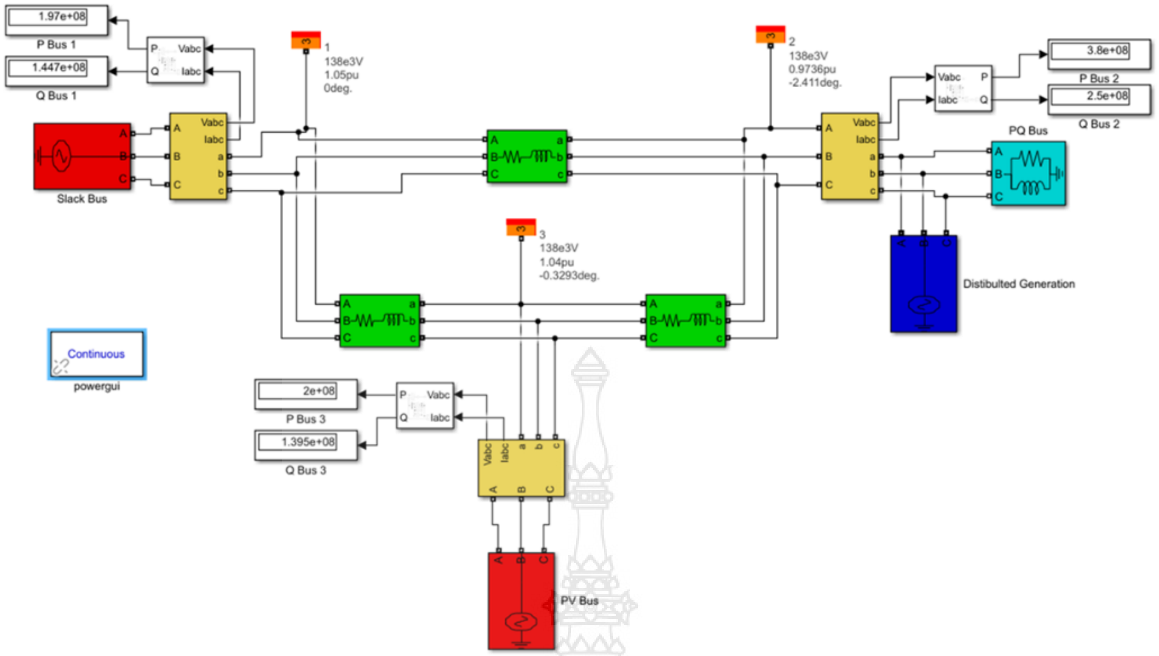
4.3 กรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

4.3.1 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK กรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ด้วยโปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 4-15, กรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-15 การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ด้วยโปรแกรม Power World

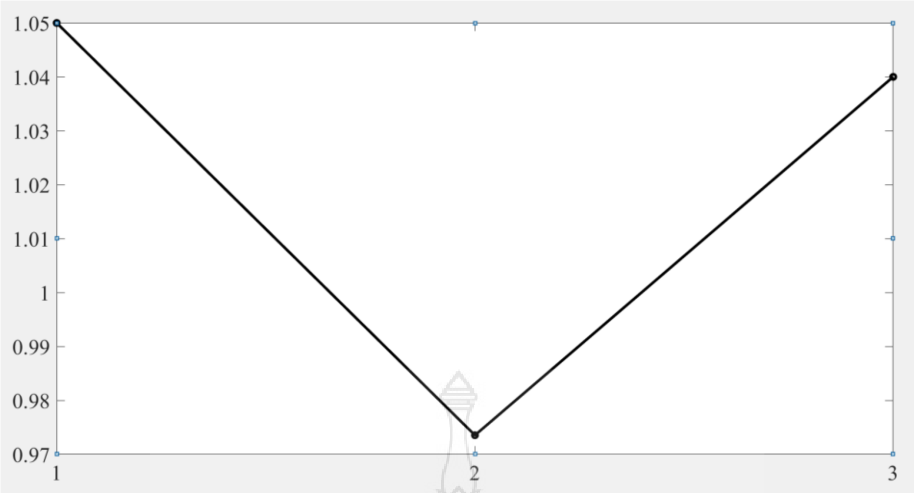


รูปที่ 4-16 การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

เมื่อทำการเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพ ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส ดังแสดงในตารางที่ 4-7, แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัสกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ดังแสดงในรูปที่ 4-17

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

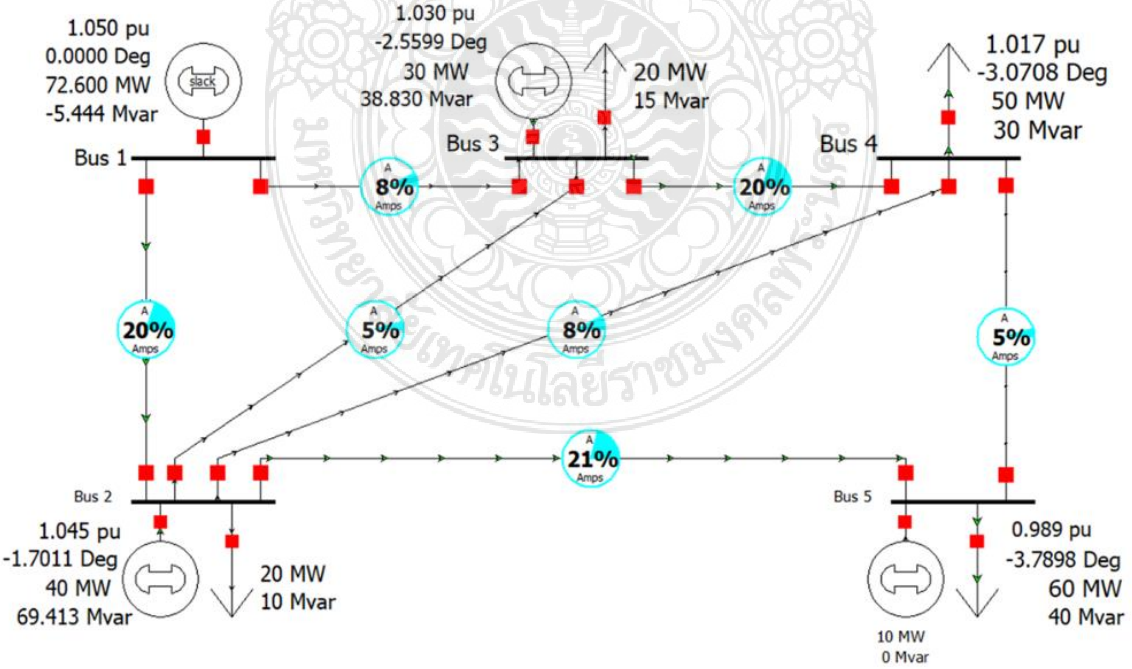
Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.05	0	0	0	197	144	0
2	0.97	-2.4173	400	250	20	0	0
3	1.04	-0.3334	0	0	200	140	0
	Total		400	250	417	284	0



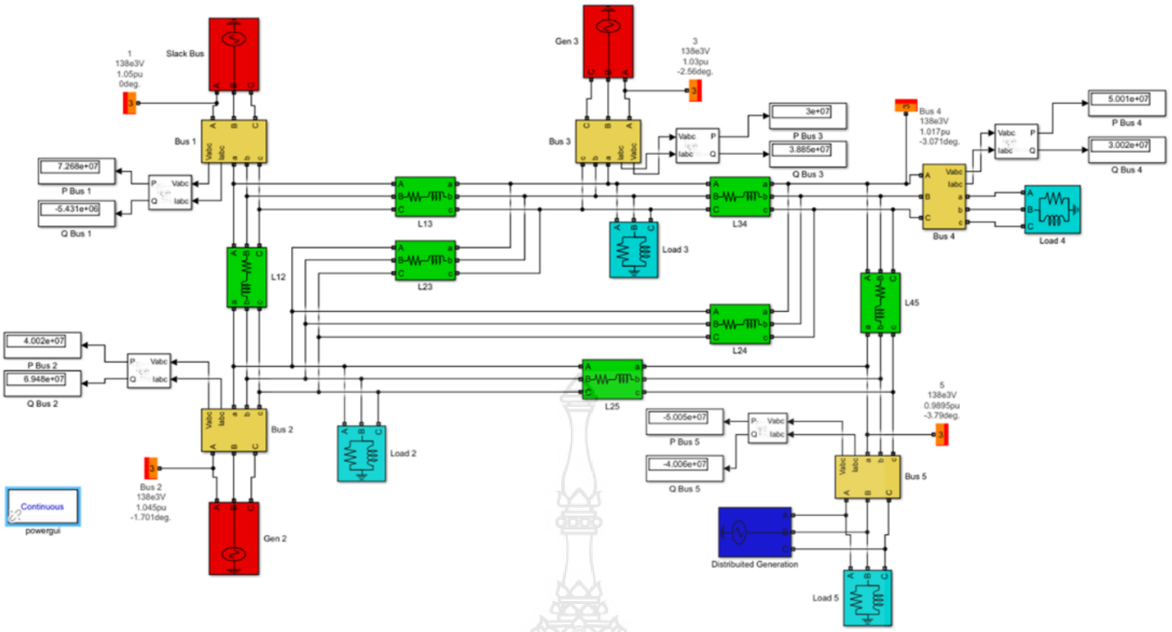
รูปที่ 4-17 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส กรณีติดเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 2 ขนาด 20 MW

4.3.2 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ด้วยโปรแกรม Power World ดังแสดงในรูปที่ 4-18, การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 4-19



รูปที่ 4-18 การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ด้วยโปรแกรม Power World

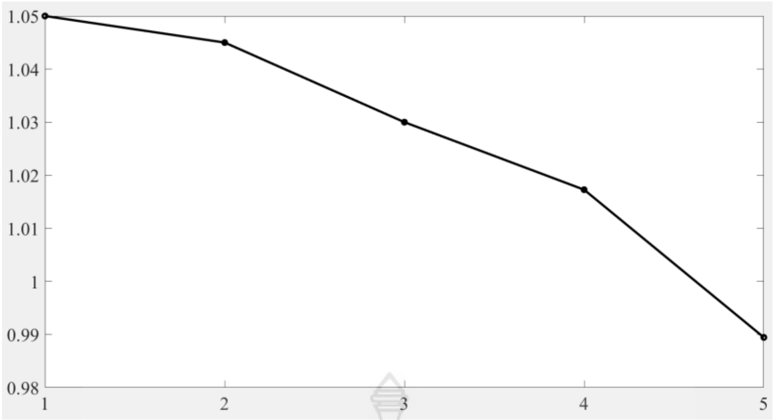


รูปที่ 4-19 การไหลกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

เมื่อทำการเพิ่มเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เพิ่มขึ้นจาก 0.986 เป็น 0.989 pu. ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพ ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ดังแสดงในตารางที่ 4-8, แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัสกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ดังแสดงในรูปที่ 4-20

ตารางที่ 4-8 ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.050	0	0	0	72.600	-5.444	0
2	1.045	-1.7011	20	10	40	69.413	0
3	1.030	-2.5599	20	15	30	38.830	0
4	1.017	-3.0708	50	30	0	0	0
5	0.989	-3.7898	60	40	10	0	0
	Total		150	95	152.6	102.799	0



รูปที่ 4-20 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส กรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW

4.3.3 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

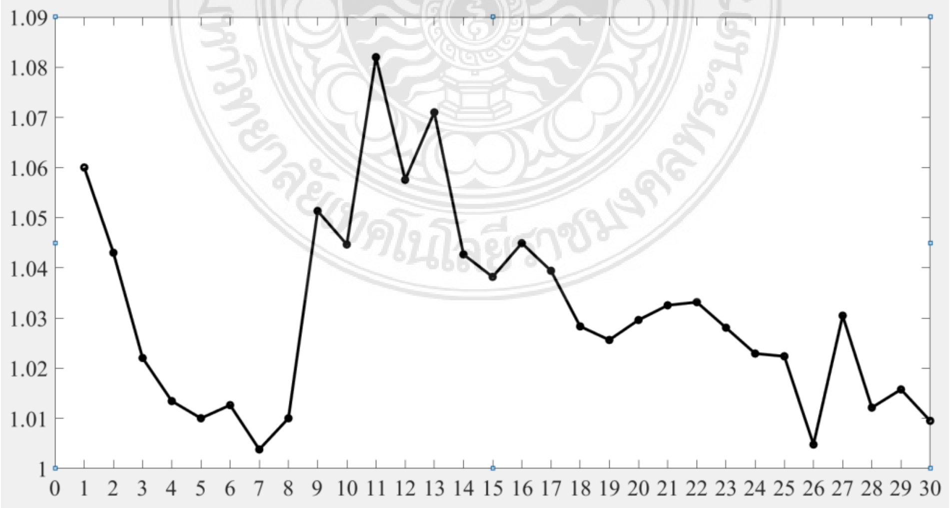
การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการทดสอบ ผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW ในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ด้วยโปรแกรม MATLAB

Bus	V	δ	Load		Generator		Injected
	(pu.)	(Degree)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	(Mvar)
1	1.060	0	0	0	255.152	-16.214	0
2	1.043	-5.371	21.7	12.7	40	47.267	0
3	1.022	-7.809	2.4	1.2	0	0	0
4	1.013	-9.423	7.6	1.6	0	0	0
5	1.010	-14.169	94.2	19.0	0	35.684	0
6	1.013	-11.106	0	0	0	0	0
7	1.004	-12.889	22.8	10.9	0	0	0
8	1.010	-11.796	30.0	30.0	0	28.766	0
9	1.051	-14.072	0	0	0	0	0
10	1.045	-15.627	5.8	2.0	0	0	19.0
11	1.082	-14.072	0	0	0	15.954	0
12	1.058	-14.954	11.2	7.5	0	0	0
13	1.071	-14.954	0	0	0	10.293	0
14	1.043	-15.822	6.2	1.6	0	0	0

Bus	V (pu.)	δ (Degree)	Load P(MW)	Load Q(MVAr)	Generator P(MW)	Generator Q(MVAr)	Injected (Mvar)
15	1.038	-15.891	8.2	2.5	0	0	0
16	1.045	-15.511	3.5	1.8	0	0	0
17	1.039	-15.799	9.0	5.8	0	0	0
18	1.028	-16.492	3.2	0.9	0	0	0
19	1.026	-16.658	9.5	3.4	0	0	0
20	1.030	-16.458	2.2	0.7	0	0	0
21	1.033	-16.041	17.5	11.2	0	0	0
22	1.033	-16.018	0	0	0	0	0
23	1.028	-16.201	3.2	1.6	0	0	0
24	1.023	-16.270	8.7	6.7	0	0	4.3
25	1.022	-15.515	0	0	0	0	0
26	1.005	-15.931	3.5	2.3	0	0	0
27	1.030	-14.792	0	0	0	0	0
28	1.012	-11.679	0	0	0	0	0
29	1.016	-15.534	2.4	0.9	0	0	0
30	1.009	-15.873	10.6	1.9	5	0	0
Total			283.4	126.2	300.152	121.750	23.3

ในกรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 30 มีแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 0.995 เป็น 1.009 pu. เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพ แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW ดังแสดงในรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-21 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสกรณีเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 30 ขนาด 5 MW

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การจัดทำปริญญานิพนธ์แบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านี้หลังจากได้ทำการศึกษาและดำเนินการทดสอบจากบทที่แล้วมา ในบทนี้ผู้จัดทำได้นำผลการดำเนินงานมาสรุป

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาและทดสอบการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าได้ทำการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม Power World และ MATLAB SIMULINK เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของทุกบัสในระบบไฟฟ้า และเพื่อศึกษากรณีศึกษาทั้ง 3 กรณีจากการศึกษาทำให้สามารถที่จะสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. สำหรับการศึกษาและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถทราบค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของทุกบัสในระบบไฟฟ้า

2. การปลดวงจรสายส่งจะส่งผลให้สายส่งไฟฟ้ารับภาระโหลดสูงเกินไปและทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสปลายทางตกเป็นผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า

3. การเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้าระบบจะสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัสปลายทางได้ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดเสถียรภาพ

4. สามารถเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 5 บัส และ 30 บัส

5.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงหลักการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

2. ได้ทราบผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 3 กรณีศึกษา

3. ได้รู้ถึงการเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 5 บัส และ 30 บัส ทั้ง 3 กรณี

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. FACTS DEVICES (อุปกรณ์ Power Electronics) ควรนำมาใช้ในการคำนวณ

2. การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังให้มีเสถียรภาพ

3. Static Load เปลี่ยนเป็น Daily Load

บรรณานุกรม

[1] Enes Cengiz, Cemal Yılmaz, Ercan Nurcan Yılmaz, Hamdi Tolga Kahraman, “Importance of Power Flow and Load Analysis in Pre-Installation Power Systems”, 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Oct 2019.

[2] Jirasak Laowanitwattana, Sermsak Uatrongjit, “Probabilistic Power Flow Analysis Based on Low Rank Approximation and Principle Component Analysis”, 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), Oct 2020.

[3] Mehmet Kurban, Ummuhan Basaran Filik, “Parameters and Power Flow Analysis of the 380 -kV Interconnected Power System in Turkey”, 2006 IEEE International Power and Energy Conference, Nov 2006.

[4] ชำนาญ ห่อเกียรติ. ระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพ: โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง, 2562.

[5] นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ. ตำราการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพ: โอ.เอส.พริ้นติ้งเฮ้าส์, 2560.

[6] P. S. Bhowmik, S. P. Bose, D. V. Rajan; S. Deb, “Power flow analysis of power system using Power Perturbation method” 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, Sept 2011.

[7] Huang Xinbo, Cheng Ronggui, “Theoretical Study on Dynamic Capacity-increase of Transmission Lines”, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, April 2008.

[8] Gang Qu, Haozhong Cheng, Liangzhong Yao, Zeliang Ma, Zhonglie Zhu, Xiaohui Wang, Jianzhong Lu, “Transmission Surplus Capacity Based Power Transmission Expansion Planning Using Chaos Optimization Algorithm”, 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 2008.

[9] M. Venkateswara Reddy, Bishnu Prasad Muni, A.V.R.S. Sarma, “Enhancement of Voltage Profile for IEEE 14 Bus System with Inter line Power Flow Controller”, 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE), Jan. 2016.

[10] Raheel Muzzammel, Muhammad Ahsan, Waqas Ahmad, “Non-linear analytic approaches of power flow analysis and voltage profile improvement”, 2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET), June 2015.

[11] Sho Kainose, Ken Nagasaka, “A research on construction of 30 bus large-scale smart grid model”, 2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), Oct 2015.

[12] M.R. Wadi, M.F. Bara, Ola Caslson, Faraj Ali Elammari, “Voltage stability analysis and improvement for the South-West Libya electrical power system part 1: Problem identification”, International Universities Power Engineering Conference, Sep 2008.

[13] Syafaruddin Syafaruddin, Satriani Latief, “Lesson Learned from Power System Design with PowerWorld Simulator”, 2018 2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Oct 2018.

[14] Fouzul Azim Shaikh, Zaheeruddin, M.S.Jameel Asghar, Gajendra Singh, “Soft Computing Techniques and Role of Power World Simulator for forecasting and mitigation of power system blackout”, ICCIMA 2007, Dec 2007.

[15] ปริญญา สงวนสัตย์. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. นนทบุรี : ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด, 2556.

การวางแผนและปฏิบัติการอย่างเหมาะสมตามแผนเหตุการณ์เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

Optimal Planning and Operation with Scenarios for Increasing Capacity of Transmission System

ณัชพล เรืองทรัพย์ นาวิน รอดเรือง นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ ปพน งามประเสริฐ และ มนัส บุญเทียรทอง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร e-mail : nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวางแผนและปฏิบัติการอย่างเหมาะสมตามแผนเหตุการณ์เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าตามแผนเหตุการณ์ ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่สูงขึ้นถ้าเกิดเหตุการณ์เพิ่มโหลดในระบบอย่างทันทีทันใดจะส่งผลให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ารับภาระโหลดทางไฟฟ้ามากเกินไป ดังนั้นจึงเสนอบทความนี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 ปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ กรณีที่ 2 เพิ่มวงจรสายส่ง กรณีที่ 3 ลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่ง กรณีที่ 4 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จากผลการทดสอบเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าพบว่ากรณีที่ 1 และ 3 ส่งผลให้ค่ากระแสในสายส่งไฟฟ้าบางวงจรสูงเกินไป ส่วนกรณีที่ 2 และ 4 ส่งผลให้สมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ:การวางแผนและปฏิบัติการ,แผนเหตุการณ์,ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

Abstract

This research paper presents optimal planning and operation with scenarios for increasing capacity of transmission system. The purpose of this study was to study the efficiency of the power transmission system according to the current events plan. At present, the power consumption tends to be higher, if a sudden increase in the load in the system will result in the transmission system being overloaded with the electrical load. Therefore, this paper is proposed to increase the efficiency of the power transmission system by The mathematical simulation program was divided into 4 case studies: Case 1 disconnecting the generator from the system, Case 2 adding a transmission line, Case 3 reducing the voltage at the reference bus and disconnecting the transmission line, Case 4 Adding a power generating source. diffuse From the results of the test to increase the efficiency of the power transmission system, it was found that cases 1 and 3 resulted in excessive current in some transmission lines, while cases 2 and 4 resulted in increased efficiency of the power transmission system.

Keywords: Planning and Operation, Scenarios, Transmission System

1. บทนำ

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั่วโลกกำลังอยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงและการปรับโครงสร้างใหม่อย่างต่อเนื่องระบบส่งกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันมีภาระทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นและดำเนินการในลักษณะที่ไม่ได้คาดคิดไว้ในตอนแรกระบบส่งกำลังไฟฟ้าต้องมีความยืดหยุ่นเพื่อตอบสนองต่อการสร้างและรูปแบบของโหลดที่หลากหลายมากขึ้น [1] ในอดีตมีวิธีการมากมายสำหรับการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1960 วิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธีนิวตันราฟสันและเก๊าส์ไซเดิ้ล [2] ในปี ค.ศ. 2010 ได้มีงานวิจัยที่จะหาการไหลที่ดีที่สุดสำหรับระบบ 30 บัสเพื่อแก้ปัญหาและลดต้นทุนการดำเนินงานด้วยโปรแกรมเพาเวอร์เวิล์ด [3] ในปี ค.ศ. 2014 มีงานวิจัยการเพิ่มความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในระบบส่งกำลังโดยใช้ ตัวชดเชยชุดซิงโครนัสแบบคงที่ ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์การไหลของพลังงานได้ดำเนินการ โดยใช้โปรแกรม MATLAB [4] ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยเป็นสื่อการสอนหนึ่งในโปรแกรมที่ถูกนำมาใช้ก็คือโปรแกรมเพาเวอร์เวิล์ด [5] เป็นโปรแกรมที่ใช้สัญลักษณ์กราฟิกแทนอุปกรณ์ระบบ เช่น บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่ง และ หม้อแปลงไฟฟ้า ผู้ใช้งานสามารถออกแบบวงจรได้ด้วยตนเอง [6]

ในบทความนี้จะนำเสนอโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการไหลในระบบไฟฟ้ากำลัง 7 บัส โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษาเพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

2. สมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ในปัจจุบันด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของเศรษฐกิจ การคมนาคม ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความจุในการส่งถูกจำกัดด้วยความร้อนของสายส่ง [7] สายส่งไฟฟ้าจะมีความจุที่กำหนดถ้าในระบบไฟฟ้ามีการเพิ่มโหลด ลดโหลดจะส่งผลให้ระบบมีสายส่งบางเส้นที่ทำงานด้วยปัจจัยโหลดสูงซึ่งในความเป็นจริงจากมุมมองของการรักษาความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือในการทำงานของระบบสายส่งจำเป็นต้องรักษาขอบความจุเพื่อให้สามารถทำงานที่ปัจจัยโหลดต่ำเพื่อรักษาความยืดหยุ่นเพียงพอในกรณีฉุกเฉิน เพื่อให้มั่นใจถึงสภาวะด้านความปลอดภัย ผู้จ่ายไฟจะปรับสายปัจจัยโหลดสูงเพื่อปรับสมดุลการทำงานของระบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ [8]

3. โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ได้รับการปรับปรุงสำหรับการฝึกอบรมวิศวกรระบบไฟฟ้า [9] โปรแกรมนี้เป็นซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ในแอพพลิเคชั่นระบบไฟฟ้าที่ผสมผสานกับเทคนิคการคำนวณ การจำลองนี้ใช้สำหรับการคาดการณ์การขัดข้องของระบบไฟฟ้า โปรแกรมจะทำการจำลองการไหลของพลังงานที่เหมาะสมและนำเสนอแอนิเมชั่นของระบบไฟฟ้าเป็นภาพเคลื่อนไหวของกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและพารามิเตอร์อื่น แบบเรียลไทม์ด้วยแอนิเมชั่นทำให้สามารถจินตนาการถึงสภาพจริงว่าเกิดอะไรขึ้นภายในระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อน นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ยังมีประสิทธิภาพและ เชื่อถือได้มากในการวิเคราะห์การไหลของโหลด การศึกษาข้อผิดพลาดรวมถึงการเลือกเบรกเกอร์วงจร สภาพของบัสและการเดินสายภายในระบบที่ซับซ้อนมาก [5] โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 1

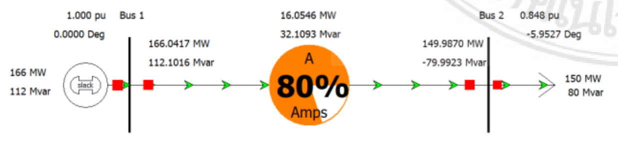
รูปที่ 1 โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์มีการคำนวณตามหลักนิวตัน-ราฟสัน สมการนิวตัน-ราฟสันดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} \left|V_i V_j Y_{ij}\right| \cos\left(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i\right) \quad (1)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} \left|V_i V_j Y_{ij}\right| \sin\left(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i\right) \quad (2)$$

โปรแกรมสามารถแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เสมือนจริง แรงดัน ขนาดของมุม กำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยที่สามารถที่จะเรียกดูกำลังไฟฟ้าที่ต้นทางกำลังไฟฟ้าปลายทาง กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของสายส่งขณะที่โปรแกรมทำการจำลองอยู่ ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

4. แผนเหตุการณ์

แผนเหตุการณ์เป็นการคาดการณ์สิ่งที่มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความเสียหาย สายส่งไฟฟ้าขาด หรือ เกิดฟอลต์ เพิ่มโหลดในระบบไฟฟ้าแบบทันทีทันใดเป็นต้นซึ่งเหตุการณ์ที่กล่าวมาส่งผลทำให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องและสูญเสียเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ในอดีตได้เกิดเหตุการไฟฟ้าขัดข้องครั้งใหญ่หลายครั้ง เช่น เหตุไฟฟ้าขัดข้องครั้งใหญ่ของสหรัฐและไฟฟ้าขัดข้องที่อิตาลี เป็นต้น [9] โดยในบทความวิจัยนี้นำเสนอกรณีศึกษา 2 กรณี และ วิธีเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า 2 กรณี

5. กรณีศึกษา

ในบทความนี้มีการประมวลผลเทคนิคที่นำเสนอด้วยโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าโดยจะเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าทดสอบในแบบจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า 7 บัสโดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ได้แก่

- กรณีที่ 1 ปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ
- กรณีที่ 2 เพิ่มวงจรสายส่ง
- กรณีที่ 3 ลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่ง
- กรณีที่ 4 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

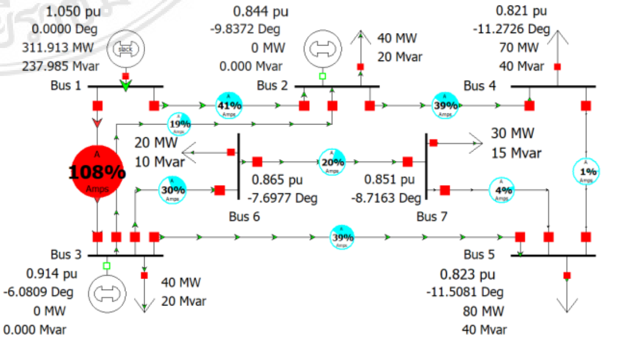
กรณีที่ 1 ปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ

ในกรณีนี้จะปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และ 3 พารามิเตอร์สายส่ง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สายส่ง

From	To	R (pu.)	X_L (pu.)
1	2	0.08	0.24
1	3	0.02	0.06
2	3	0.06	0.18
2	4	0.01	0.03
3	5	0.04	0.12
3	6	0.04	0.06
4	5	0.08	0.24
5	7	0.02	0.45
6	7	0.01	0.04

การไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3 และ ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 การไหลกรณีปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ

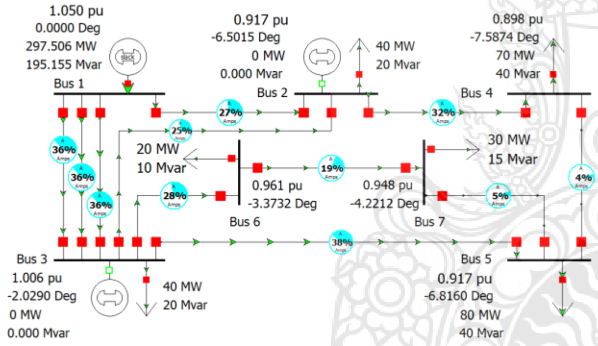
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการไหลกรณีปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ

Bus	Type	V	δ	Load		Generator	
	Bus	(p.u.)	(Degree)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	Slack	1.050	0	0	0	311.919	237.979
2	PV	0.844	-9.8376	40	20	0	0
3	PV	0.914	-6.0811	40	20	0	0
4	PQ	0.821	-11.2730	70	40	0	0
5	PQ	0.823	-11.5086	80	40	0	0
6	PQ	0.865	-7.6980	20	10	0	0
7	PQ	0.851	-8.7166	30	15	0	0

เมื่อปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงทำงานหนักเกินไปส่งผลให้ค่ากระแสในสายส่งไฟฟ้าบางวงจรสูงเกินไปมีผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งและสมรรถนะในระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง

กรณีที่ 2 เพิ่มวงจรสายส่ง

ในกรณีนี้อ้างอิงจากกรณีที่ 1 โดยเพิ่มวงจรสายส่ง L13 จำนวน 2 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 4 และ ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 4 การเพิ่มวงจรสายส่ง L13 จำนวน 2 เส้น

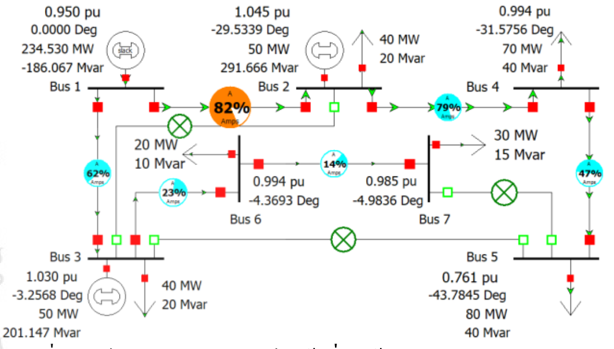
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเพิ่มเพิ่มวงจรสายส่ง L13 จำนวน 2 เส้น

Bus	Type	V	δ	Load		Generator	
	Bus	(p.u.)	(Degree)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	Slack	1.050	0	0	0	297.506	195.155
2	PV	0.917	-6.5015	40	20	0	0
3	PV	1.006	-2.0290	40	20	0	0
4	PQ	0.898	-7.5874	70	40	0	0
5	PQ	0.917	-6.8160	80	40	0	0
6	PQ	0.961	-3.3732	20	10	0	0
7	PQ	0.948	-4.2212	30	15	0	0

เมื่อเพิ่มวงจรสายส่งไฟฟ้าพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในสายส่งมีค่าลดลงส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงลดการผลิตได้ 14.407 MW เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 และสามารถเพิ่มสมรรถนะในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

กรณีที่ 3 ลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่ง

ในกรณีนี้จะให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงมีค่า 0.95 p.u. และปลดวงจรสายส่งได้แก่ L23 L35 L57 การไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงมีค่า 0.95 p.u. และปลดวงจรสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 5 และผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 5 การไหลกรณีลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่ง

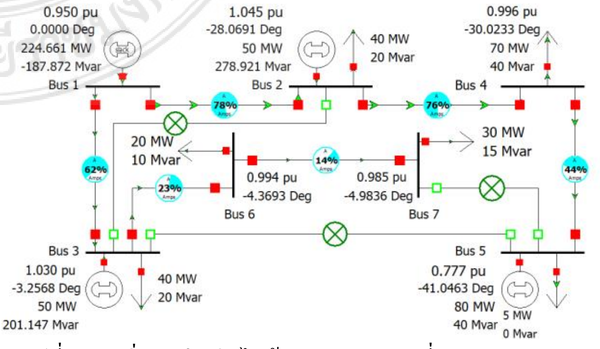
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกรณีลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่ง

Bus	Type	V	δ	Load		Generator	
	Bus	(p.u.)	(Degree)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	Slack	0.950	0	0	0	234.530	-186.067
2	PV	1.045	-29.5339	40	20	50	291.666
3	PV	1.030	-3.2568	40	20	50	201.147
4	PQ	0.994	-31.5756	70	40	0	0
5	PQ	0.761	-43.7845	80	40	0	0
6	PQ	0.994	-4.3693	20	10	0	0
7	PQ	0.985	-4.9836	30	15	0	0

เมื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงมีค่า 0.95 p.u. และปลดวงจรสายส่งพบว่าสายส่งบางเส้นรับภาระโหลดทางไฟฟ้าสูงเกินไปส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบและสมรรถนะในระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง

กรณีที่ 4 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ในกรณีนี้อ้างอิงจากกรณีที่ 3 โดยเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด5 MW ดังแสดงในรูปที่ 6 และผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 5



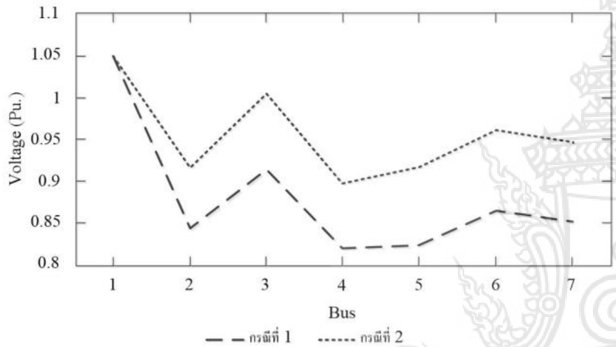
รูปที่ 6 การเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 5 MW

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 5 MW

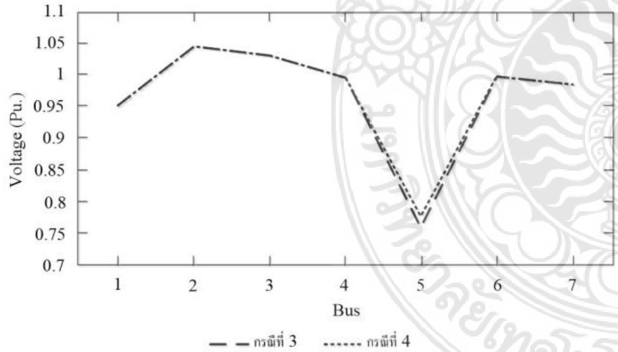
Bus	Type Bus	V (p.u.)	δ (Degree)	Load P(MW)	Load Q(Mvar)	Generator P(MW)	Generator Q(Mvar)
1	Slack	0.950	0	0	0	224.661	-187.872
2	PV	1.045	-28.0691	40	20	50	278.921
3	PV	1.030	-3.2568	40	20	50	201.147
4	PQ	0.996	-30.0233	70	40	0	0
5	PQ	0.777	-41.0463	80	40	5	0
6	PQ	0.994	-4.3693	20	10	0	0
7	PQ	0.985	-4.9836	30	15	0	0

เมื่อเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 5 MW พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมรรถนะในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ผลลัพธ์แรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 7 และ ผลลัพธ์แรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีที่ 3 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้ากรณีปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ และ กรณีปลดวงจรสายส่ง



รูปที่ 8 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้ากรณีลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่ง และเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวางแผนและปฏิบัติการอย่างเหมาะสมตามแผนเหตุการณ์เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าทดสอบด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้ดำเนินการ 4 กรณีดังนี้ กรณีที่ 1 ปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ กรณีที่ 2 เพิ่มวงจรสายส่ง กรณีที่ 3 ลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่ง กรณีที่ 4 เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว พบว่าในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 3 เมื่อปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ ลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงและปลดวงจรสายส่งตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากระแสในสายส่งไฟฟ้าบางวงจรสูงเกินไปมีผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ส่วนกรณีที่ 2 และกรณีที่ 4 เมื่อเพิ่มวงจรสายส่ง และ เพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวตามลำดับ สามารถเพิ่มสมรรถนะในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โครงการ ส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ งบประมาณปี 2564

เอกสารอ้างอิง

[1] A. L. P. de Oliveira, “The Main Aspects of Fixed Series Compensations Dimensioning at Brazilian 230 kV Transmission System”, 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Aug 2008.

[2] Enes Cengiz, Cemal Yilmaz, Ercan Nurcan Yilmaz, Hamdi Tolga Kahraman, “Importance of Power Flow and Load Analysis in Pre-Installation Power Systems”, 2019 3rd ISMSIT, Oct 2019.

[3] Harprit Kaur, Y.S Brar, Jaswinder Singh Randhawa, “Optimal power flow using power world simulator”, IEEE Electrical Power & Energy Conference, Aug 2010.

[4] C.Anitha, P.Arul, “Enhancement of voltage stability in transmission system using SSSC”, International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, March 2015.

[5] Syafaruddin Syafaruddin, Satriani Latief, “Lesson Learned from Power System Design with PowerWorld Simulator”, 2018 2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Oct 2018.

[6] Fouzul Azim Shaikh, Zaheeruddin, M.S.Jameel Asghar, Gajendra Singh, “Soft Computing Techniques and Role of Power World Simulator for forecasting and mitigation of power system blackout”, ICCIMA 2007, Dec 2007.

[7] Huang Xinbo, Cheng Ronggui, “Theoretical Study on Dynamic Capacity-increase of Transmission Lines”, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, April 2008.

[8] Gang Qu, Haozhong Cheng, Liangzhong Yao, Zeliang Ma, Zhonglie Zhu, Xiaohui Wang, Jianzhong Lu, “Transmission Surplus Capacity Based Power Transmission Expansion Planning Using Chaos Optimization Algorithm”, 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 2008.

[9] M.R. Wadi, M.F. Bara, Ola Caslson, Faraj Ali Elammari, “Voltage stability analysis and improvement for the South-West Libya electrical power system part 1: Problem identification”, International Universities Power Engineering Conference, Sep 2008.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ

ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

ชื่อ-สกุล : นายณัชพล เรืองทรัพย์

วัน เดือน ปีเกิด : 24 มกราคม 2543

ที่อยู่ปัจจุบัน : เลขที่ 122 แขวงบางมด เขตจอมทอง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10150

อีเมล์ : natchapol@ieee.org

ประวัติการศึกษา : พ.ศ.2561 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนปลาย
โรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พ.ศ.2565 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชมงคลพระนคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

ชื่อ-สกุล : นายนาวิน รอดเรือง

วัน เดือน ปีเกิด : 22 กรกฎาคม 2542

ที่อยู่ปัจจุบัน : เลขที่ 401 แขวงบางยี่ขัน เขตบางพลัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10700

อีเมล์ : nawin@ieee.org

ประวัติการศึกษา : พ.ศ.2558 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนต้น
โรงเรียนโยนออฟอาร์ค จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พ.ศ.2561 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ
วิทยาลัยเทคโนโลยีพระรามหก จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พ.ศ.2565 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชมงคลพระนคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร