

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การคำนวณโหลดโพลีโดยที่แสดงเป็นกราฟฟิกของระบบ GRAPHICAL LOAD FLOW CALCULATION



เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 36971
วัน, เดือน, ปี..... 30 ส.ค. 2543

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542

การคำนวณโหลดไฟฟ้โดยที่แสดงเป็นกราฟฟิคของระบบ
GRAPHICAL LOAD FLOW CALCULATION



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์

อาจารย์ชาย ชมภูอินใจ

อาจารย์เชาว์ ชมภูอินใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การคำนวณโหลดโพลโดยที่แสดงเป็นกราฟฟิกของระบบ

ผู้จัดทำ

- 
1. นายสุรศักดิ์ อินยาวิเลิศ
 2. นายโสภณ แสงทอง


อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณโหลดโพลโดยที่แสดงเป็นกราฟฟิกของระบบ

นายสุรศักดิ์ อินชาวิเลิศ

นายโสภณ แสงทอง

รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ซึ่งใช้วิธีการคำนวณของ เกาส์-ไซเคิล วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และวิธีดีคัปเปิลในการหาค่าของกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแคล์ไฟล์ในการเขียนโปรแกรม ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้กันมากในการเขียนโปรแกรมบนวินโดวส์ และผลของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจะแสดงทิศทางการไหลในลักษณะกราฟฟิกของระบบ ซึ่งการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้านี้จะมีประโยชน์อย่างมากในการออกแบบและวางแผนสำหรับการจัดการกับระบบไฟฟ้าที่จะมีการขยายระบบต่อไปในอนาคต

GRAPHICAL LOAD FLOW CALCULATION

Surasak Inyawilerd

Sophon Saengthong

Assc.Prof.Monton Leelajindakairerk Advisor

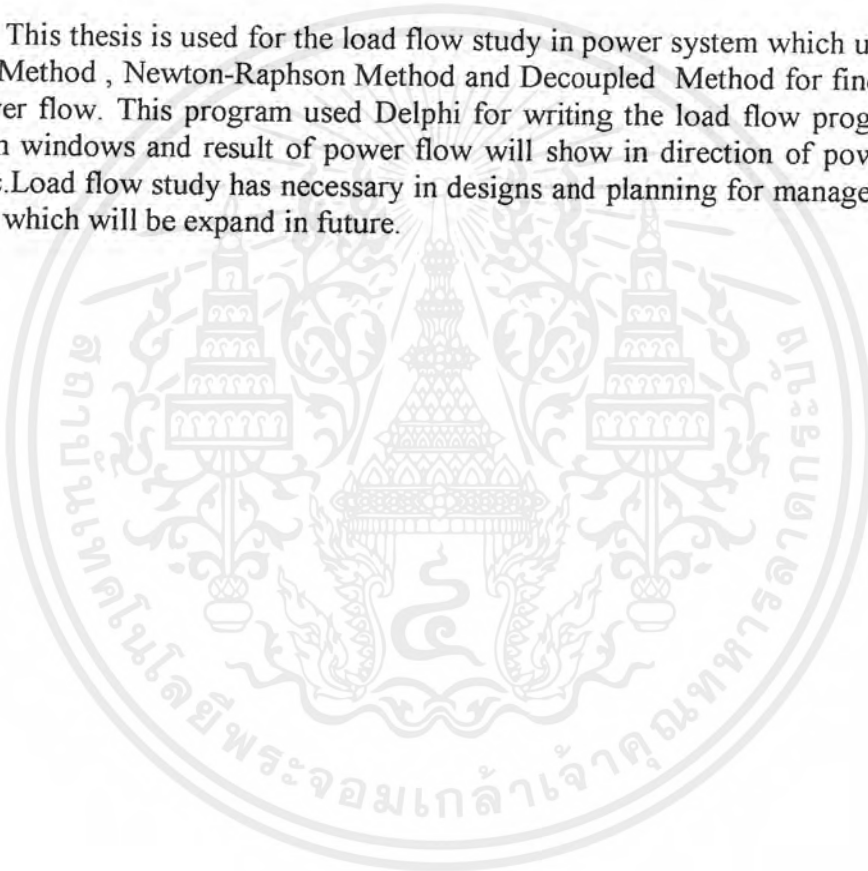
Chai Chompoo-inwai Advisor

Chow Chompoo-inwai Advisor

1999

ABSTRACT

This thesis is used for the load flow study in power system which used Gauss-Seidel Method , Newton-Raphson Method and Decoupled Method for find the value of power flow. This program used Delphi for writing the load flow program which used on windows and result of power flow will show in direction of power flow in graphic. Load flow study has necessary in designs and planning for manage the power system which will be expand in future.



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VI
บทที่1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	2
1.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.3 ขอบเขตการทำปริญญานิพนธ์	2
บทที่2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลของไหล	3
2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของไหล	3
2.2 ข้อมูลสำหรับการศึกษาการไหลของไหล	3
2.3 ชนิดของบัส	6
2.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรจ่าย	9
2.5 แบบจำลองระบบ	12
2.6 สมการการไหลของไหล	16
2.7 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลและกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลง	18
2.8 การแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น	20
บทที่3 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณการไหลของไหล	22
3.1 วิธีเกาส์-ไซเดล	22
3.2 วิธีนิวตัน-ราฟสัน	26
3.3 วิธีดีคัมป์เบล	35
บทที่4 การออกแบบ และวิธีการใช้โปรแกรม	40
4.1 โพลซาร์จการวิเคราะห์การไหลของไหล	43
4.2 วิธีการใช้โปรแกรม	46
บทที่5 ผลการทดสอบโปรแกรมไหลโพล	56
5.1 รูปแบบการนำเสนอผลการทดสอบ	56
5.2 ผลการทดสอบโปรแกรม	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส	61
5.2.2 การทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส	64
5.2.3 การทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส	67
บทที่ 6 สรุป วิเคราะห์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	75
ภาคผนวก	77
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 (a) แอ็กทีฟเพาเวอร์ที่บัส i สำหรับการศึกษาคาร์โหลดของโหลด	5
รูปที่ 2.1 (b) รีแอ็กทีฟเพาเวอร์ที่บัส i สำหรับการศึกษาคาร์โหลดของโหลด	5
รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ของบัสแต่ละชนิด	7
รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	10
รูปที่ 2.4 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.6 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทป	15
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลอย่างง่ายในระบบเปอร์ยูนิต สำหรับการคัปปลิง (Coupling) ระหว่างขดลวดคานปฐมภูมิและขดลวดคานทุติยภูมิ	15
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลพายนี่ที่ใช้แทนสายส่ง	19
รูปที่ 2.9 แบบจำลองหม้อแปลง	20
รูปที่ 4.1 แสดงการวาดระบบไฟฟ้ากำลัง	46
รูปที่ 4.2 แสดงการป้อนข้อมูลของ Generator	47
รูปที่ 4.3 แสดงการป้อนค่า Tolerance (ϵ)	48
รูปที่ 4.4 แสดงการป้อนค่าจำนวนรอบสูงสุดในการคำนวณ	49
รูปที่ 4.5 แสดงการป้อนค่า Base (MVA)	50
รูปที่ 4.6 แสดงผลจากการไหลข้อมูลลงในตาราง	51
รูปที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณของระบบไฟฟ้ากำลัง	52
รูปที่ 4.8 แสดงตารางผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง	53
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟฟิสิกของระบบไฟฟ้ากำลัง	54
รูปที่ 5.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	56
รูปที่ 5.2 แสดงตารางผลการคำนวณของระบบไฟฟ้ากำลัง	57
รูปที่ 5.3 แสดงตารางผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง	58
รูปที่ 5.4 แสดงกราฟฟิสิกของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	60
รูปที่ 5.5 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส	61

รูปที่ 5.6 แสดงกราฟฟิสิกของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส	63
รูปที่ 5.7 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส	64
รูปที่ 5.8 แสดงกราฟฟิสิกของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส	66
รูปที่ 5.9 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส	67
รูปที่ 5.10 แสดงกราฟฟิสิกของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส	74



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปปัญหาการไหลของโหลด	9
ตารางที่ 4.1 สมการการไหลของโหลด และวิธีการแก้ปัญหา	40
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง	59
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง	59
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน	62
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 4 บัสด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน	62
ตารางที่ 5.5 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 14 บัส ด้วยวิธีคัลป์เปิด	65
ตารางที่ 5.6 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 14 บัสด้วยวิธีคัลป์เปิด	65
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 30 บัส ด้วยวิธีของเกาส์-ไซเดล	68
ตารางที่ 5.8 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 30 บัสด้วยวิธีของด้วยวิธีของเกาส์-ไซเดล	69
ตารางที่ 5.9 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 30 บัส ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน	70
ตารางที่ 5.10 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 30 บัสด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน	71
ตารางที่ 5.11 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า กำลังขนาด 30 บัส ด้วยวิธีคัลป์เปิด	72
ตารางที่ 5.12 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 30 บัสด้วยวิธีคัลป์เปิด	73

ตาราง แสดงข้อมูลในการรันโปรแกรมของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัต์	68
ตาราง แสดงข้อมูลในการรันโปรแกรมของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัต์	69
ตาราง แสดงข้อมูลในการรันโปรแกรมของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัต์	70



บทที่ 1

บทนำ

ในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow studies) ต้องทำความเข้าใจกับความหมายของคำว่า การไหลของกำลังไฟฟ้า ก่อน ในความจริงกำลังไฟฟ้าที่กระจายอยู่ที่ระบบไฟฟ้ากำลังไม่ได้มีการไหลหรือเคลื่อนที่ไปไหนแต่ไหลอยู่ที่อยู่กับที่เหล่านี้ต้องการกำลังไฟฟ้าสำหรับการทำงาน ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการส่ง และจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตซึ่งก็คือ โรงจักรไฟฟ้าไปสู่โหลดพื้นที่ต่างๆ แต่การก่อสร้างโรงจักรไฟฟ้า ก็มีอยู่หลายพื้นที่ด้วยกันและมีการต่อเชื่อมถึงกันด้วยสายส่งจึงสามารถช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้อย่างเพียงพอกับความต้องการของโหลดด้วยเหตุนี้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลไปสู่โหลด ได้ทั่วทั้งระบบไฟฟ้าที่มีการต่อเชื่อมถึงกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้านั่นเอง

การศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้าถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของการศึกษาระณีต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้า กระแส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังที่บัสต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะต่าง ๆ อันได้แก่ การวิเคราะห์ความผิดปกติ การวิเคราะห์เสถียรภาพ

ผลจากการศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าก็จะนำมาพิจารณาว่าค่าต่างๆอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ แรงดันไฟฟ้าทุกจุดในระบบมีค่าไม่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไป กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจุดต่างๆมีค่าไม่มากเกินไปกว่าอัตราของอุปกรณ์หรือสายไฟที่จะรับได้ กำลังไฟฟ้ามีขนาดมากกว่าที่อุปกรณ์ในระบบแต่ละตัวจะรับได้หรือไม่ และสามารถวิเคราะห์แก้ไขระบบในสภาพการทำงานทั้งในเวลาปกติและในเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้

นอกจากนี้การศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้ายังใช้ในการวางแผนงานในระบบไฟฟ้ากำลังที่จะเริ่มดำเนินการก่อสร้างรวมทั้งเพิ่มเติมอุปกรณ์ไม่ว่าจะเป็นการสร้างโรงจักรใหม่ เพิ่มหรือลดสายส่ง จำเป็นต้องผ่านการวิเคราะห์ทางด้านกรไหลของกำลังไฟฟ้าเสียก่อน เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีการทำงานที่สมบูรณ์ได้และถ้าผลเป็นที่น่าพอใจจึงจะลงมือซื้อและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้ากับระบบจริง

ในปัจจุบัน การศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น สามารถช่วยให้ผู้ที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องตัดสินใจได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดขึ้นภายในระบบควรมีการแก้ไขอย่างไร เพื่อให้การผลิตและการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่

เป็นไปอย่างปกติ ไม่ใช่การเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใดหรือการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดการวงจรภายในระบบ

1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 เพื่อศึกษาเทคนิคที่จะนำมาพัฒนาวิธีของเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel Method) วิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) และ วิธีดีคัปเปิล (Decoupled Method) ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า
- 1.1.2 เพื่อจัดทำโปรแกรมในการอำนวยความสะดวก สำหรับออกแบบระบบของไฟฟ้ากำลัง แล้วคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าให้แสดงผลทางกราฟฟิกที่มีประสิทธิภาพ
- 1.1.3 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการคำนวณที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ที่เป็นพื้นฐานได้แก่ วิธีของ เกาส์-ไซเดล ,วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และ วิธีดีคัปเปิล
- 1.1.4 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมต่อไป

1.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1.2.1 ศึกษาทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยค้นคว้าจากหนังสือ วารสารต่างๆ และจาก Web Site ทาง Internet
- 1.2.2 ศึกษาการเขียนโปรแกรม Delphi รวบรวม สรุป Algorithm ในการเขียนโปรแกรม
- 1.2.3 ทำการออกแบบโปรแกรมเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เปรียบเทียบ ทดสอบและพัฒนาโปรแกรม
- 1.2.4 วิเคราะห์ผล ปัญหาพร้อมทั้งแก้ไขและสรุปผลที่ได้จากการวิจัย
- 1.2.5 เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดทำปฏิญานิพนธ์

1.3 ขอบเขตในการทำปฏิญานิพนธ์

ขอบเขตของปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีของเกาส์-ไซเดล วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และวิธีดีคัปเปิล จัดทำโปรแกรมที่มีความสามารถในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังแล้ววิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีของเกาส์-ไซเดล วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และวิธีดีคัปเปิล แล้วแสดงผลทางกราฟฟิกและเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของการศึกษากรณีต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้า กระแส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังที่ต่างกันในระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะต่างๆ อันได้แก่ การวิเคราะห์ความผิดปกติ การวิเคราะห์เสถียรภาพ ข้อมูลสำคัญที่ได้จากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันแต่ละบัส กำลังจริง กำลังรีแอกทีฟที่ไหลในสายแต่ละอุปกรณ์ เช่น สายส่งและหม้อแปลงต่างๆรวมทั้งกำลังสูญเสียในอุปกรณ์เหล่านั้น

2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในนี้จะถือเป็นบรรทัดฐานที่ใช้อ้างอิงในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 2.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นระบบไฟฟ้าสมดุล 3 เฟส อยู่ในภาวะการทำงานปกติ (Steady state condition)
- 2.1.2 ในการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ และสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจะยึดบัสเป็นกรอบอ้างอิง (Bus frame of reference)
- 2.1.3 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้ามียบัสอ้างอิงเพียง 1 บัส
- 2.1.4 ให้ถือว่าโหลดทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษาคงที่
- 2.1.5 วงจรสมมูลของสายส่งและหม้อแปลงเป็นแบบพายน์ (Equivalent pi circuit : π)

2.2 ข้อมูลสำหรับการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า

ค่า self-admittance และค่า mutual-admittance ซึ่งประกอบด้วยเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ Y_{bus} หรือจุดขั้วเคลื่อน และอิมพีแดนซ์ถ่ายโอนซึ่งประกอบด้วย Z_{bus} ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยจัดเตรียมข้อมูลให้คอมพิวเตอร์เป็นแผนภาพเส้นเดียว (one-line diagram) ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าจะถูกแสดงเป็นวงจรต่อเฟส และมีวงจรเทียบเคียงเป็นพายน์ (π) ค่าของอิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ชั้นที่ของสายส่งจึงจำเป็นมากต่อคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณาส่วนประกอบย่อย Y_{bus} หรือ Z_{bus} ตลอดจนข้อมูลสำคัญอื่นๆ ทำให้สามารถตัดสินใจเลือกขนาดของบัส

แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ $N \times N$ ใดๆของ Y แต่ละตัวซึ่งก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta + j |Y_{ij}| \sin \theta = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.1)$$

ข้อมูลที่มีความสำคัญอาจจะรวมไปถึง พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัดของขั้ว-คาปาซิเตอร์ และการปรับเทปของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า แรงดันบัสและกำลังไฟฟ้าที่ถูกส่งออกมาจะต้องถูกกำหนดให้ทราบแรงดันไฟฟ้าที่บัส ของระบบจะถูกกำหนดให้เป็น โพลาร์-โคออร์ดิเนต โดย

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (2.2)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่บัส j จะถูกเขียนคล้ายๆกัน โดยเปลี่ยนลำดับคริปท์จาก i เป็น j กระแสไฟฟ้าสุทธิที่ไหลเข้าไปในเน็ทเวิร์คที่บัส i เทอมของ Y_m ของ Y_{bus} จะถูกกำหนดให้เป็นผลรวมโดย

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n = \sum_{n=1}^n Y_{in}V_n \quad (2.3)$$

ให้ P_i และ Q_i ใช้แทนกำลังจริงสุทธิ และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสุทธิที่ไหลเข้าไปในเน็ทเวิร์คที่บัสจากนั้นกำลังไฟฟ้าคอมเพล็กซ์คอนจูเกตจะไหลเข้าที่บัส i เป็น

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^n Y_{in}V_n \quad (2.4)$$

และจากสมการ (2.1) และ (2.2) ซึ่งจะได้ว่า

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^n |Y_{in}V_iV_n| \angle (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.5)$$

จากสมการนี้จะสามารถแยกเป็นส่วนของสมการของส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ว่า

$$Q_i = \sum_{n=1}^n |Y_{in}V_iV_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.6)$$

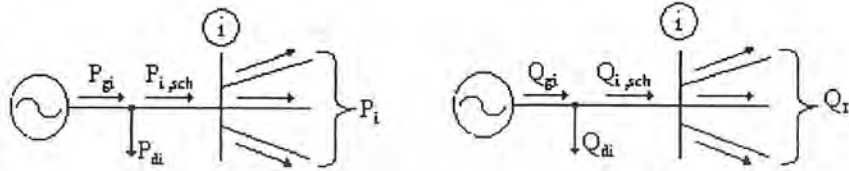
$$P_i = \sum_{n=1}^n |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.7)$$

สมการ(2.6)และ(2.7)จะประกอบด้วยโพลาร์ฟอร์มของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งสมการนี้จะใช้เตรียมสำหรับคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิ P_i และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสุทธิ Q_i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไหลเข้าไปในเน็ทเวิร์คที่บัส i ให้ P_{gi} แทนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตส่งไปที่บัส i และให้ P_{di} แทนด้วยความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดที่บัส i และ

$P_{i,sch} = P_{gi} - P_{di}$ ซึ่งจะเป็นค่าของกำลังไฟฟ้าสเชดเคิลสุทธิต่ไหลเข้าเน็ทเวิร์คที่บัส i แสดงดังรูป 2.1(a)



รูปที่ 2.1(a) แอกทีฟเพาเวอร์ และ (b) รีแอกทีฟเพาเวอร์ที่บัส i
สำหรับการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า

แทนค่าที่ใช้คำนวณค่าของ P_i ด้วย $P_{i,sch}$ ค่ามิสแมทซ์ ΔP_i จะเป็นค่าของสเชดเคิล $P_{i,sch}$ ลบด้วยค่าคำนวณ $P_{i,calc}$ ทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส i จะได้ว่า

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \quad (2.8)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,calc} = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \quad (2.9)$$

ดังแสดงในรูป 2.1(b) ค่ามิสแมทซ์ที่ปรากฏในวิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อค่าคำนวณของ P_i และ Q_i เกิดขึ้นไม่พร้อมกันกับค่าของสเชดเคิล ถ้าค่าคำนวณ $P_{i,calc}$ และ $Q_{i,calc}$ แมทซ์กับค่าสเชดเคิล $P_{i,sch}$ และ $Q_{i,sch}$ อย่างสมบูรณ์แล้วละก็ ก็จะสมารถกล่าวได้ว่าค่ามิสแมทซ์ ΔP_i และ ΔQ_i นั้นเป็นศูนย์ที่บัส i และสามารถที่จะเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าที่สมดุลได้ว่า

$$g_i'' = Q_i - Q_{i,sch} = Q_i - (Q_{gi} - Q_{di}) = 0 \quad (2.10)$$

$$g_i' = P_i - P_{i,sch} = P_i - (P_{gi} - P_{di}) = 0 \quad (2.11)$$

จะพบว่าฟังก์ชัน g_i' และ g_i'' จะเขียนได้สะดวกสำหรับสมการที่อ้างอิงถึงค่ามิสแมทซ์ ΔP_i และ ΔQ_i ถ้าบัส i ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือไม่มีโหลดเทอมที่เหมาะสมที่จะต้องถูกปรับให้เท่ากับศูนย์ในสมการ(2.10)และ(2.11) ในแต่ละบัสของเน็ทเวิร์คจะมีสมการอยู่สองสมการและปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้าจะถูกแก้ปัญหาโดยใช้สมการ(2.6)และ(2.7)สำหรับค่าของแรงดันบัสที่ยังไม่ทราบค่า สมการ(2.10)และ(2.11)จะให้ค่าที่ยอมรับได้ที่แต่ละบัส ถ้าไม่มีค่าสเชดเคิลสำหรับบัส i นั้นค่ามิสแมทซ์ $\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc}$ จะไม่สามารถกำหนดได้และสมการที่(2.10)ก็จะนำมาใช้ไม่ได้ใน

การนำมาแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันถ้า $Q_{i,sch}$ ไม่มีที่บัส i สมการ(2.11)ก็จะใช้ไม่ได้ด้วยเช่นกัน

2.3 ชนิดของบัส

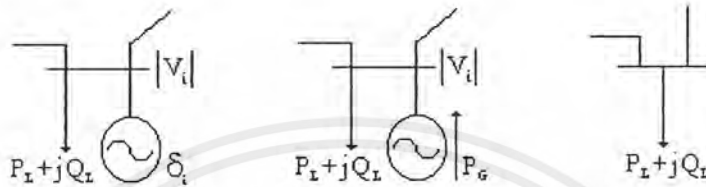
ก่อนที่จะศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องทราบการแบ่งชนิดของบัสเสียก่อนเพื่อจะได้ทราบว่าบัสแต่ละชนิดมีข้อกำหนดหรือค่าพารามิเตอร์ใดมีค่าคงตัว และต้องผ่านการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่าอะไรออกมา พารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละบัสประกอบด้วย ขนาดศักดาไฟฟ้า $|V_i|$, มุมของศักดาไฟฟ้า δ_i , กำลังไฟฟ้าบัสจริง P และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q โดยทั่วไปแต่ละบัสจะทราบค่าพารามิเตอร์สองค่า ส่วนอีกสองค่าหาจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าบัสจริงหรือกำลังไฟฟ้าบัสรีแอกทีฟหมายถึงกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส

ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็นสามชนิดโดยมีข้อกำหนดต่างๆในบัสแต่ละชนิดดังนี้

1. แสลคบัส (Slack Bus) บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียก สวิงบัส (Swing Bus) หรือบัสอนันต์ (Infinite Bus) หรือบัสอ้างอิง (Reference Bus) บัสชนิดนี้มีขนาดศักดาไฟฟ้าคงที่ มุมคงที่และโดยทั่วไปกำหนดให้เป็นมุมศูนย์โดยใช้บัสนี้เป็นบัสอ้างอิงที่มุมของบัสอื่นจะมาเทียบกับบัสนี้ บัสดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดใหญ่ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าออกมาตามต้องการได้โดยขนาดศักดาไฟฟ้าและความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติบัสที่จะถือเป็นบัสอ้างอิงนี้หมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่ออยู่หรือเป็นระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ พารามิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่สำหรับบัสนี้ก็คือ ขนาดศักดาไฟฟ้าและมุมของศักดาไฟฟ้า ส่วน P และ Q ของบัสนี้หาได้จากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า พิจารณารูปที่ 2.2 เพื่อให้เข้าใจแสลคบัสและพารามิเตอร์ของบัส

2. เจนบัส (Generator Bus) บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียก โวลท์ที่เจดคอนโทรลลิ่งบัส (Voltage-Controlled Bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่หรือมีทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดต่ออยู่ และบัสดังกล่าวสามารถควบคุมศักดาไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ได้ถ้าต้องการโดยอาศัย AVR (Automatic Voltage Regulator) ดังนั้นขนาดศักดาไฟฟ้าบัสมีค่าคงที่ $|V_i|$ กำลังไฟฟ้าบัสจริง P มีค่าคงที่ บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียกว่า PV บัส นอกจากนี้บางครั้งกำหนดบัสนี้ให้มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคงที่ในกรณีหลังนี้ก็เรียกว่า PQ บัส ถ้าเจนบัสเป็นชนิด PV บัส พารามิเตอร์ที่ต้องหาค่าจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าก็คือค่า Q และ δ_i ถ้าเจนบัสเป็นชนิด PQ บัส พารามิเตอร์ที่ต้องหาค่าจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าก็คือค่า $|V_i|$ และ δ_i พิจารณารูปที่ 2.2 เพื่อให้เข้าใจเจนบัสและพารามิเตอร์ของบัส

3. โหลดบัส (Load Bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่แต่จะมีโหลดต่ออยู่ซึ่งทราบค่ากำลังไฟฟ้าจริง P และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q หรือบางครั้งก็เรียกว่า PQ บัส ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาค่าจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าก็คือ ขนาดศักดาไฟฟ้า $|V_i|$ และมุมของศักดาไฟฟ้า δ_i



รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ของบัสแต่ละชนิด

เพื่อที่จะเข้าใจว่าทำไมค่า P_i และ Q_i ไม่เป็นค่าสเกลเดิลที่แสดงบัสโดยพิจารณาที่แต่ละบัสของระบบดังสมการ(2.10)จะสามารถเขียน i ให้มีขอบเขตจาก 1 ถึง n เมื่อผลลัพธ์ของจำนวนสมการ n สมการถูกพิจารณารวมเข้าด้วยกันจะได้ว่า

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n P_{gi} - \sum_{i=1}^n P_{di} \quad (2.12)$$

โดยที่ $\sum_{i=1}^n P_i$ = กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสีย

$\sum_{i=1}^n P_{gi}$ = ผลรวมของการผลิต

$\sum_{i=1}^n P_{di}$ = ผลรวมโหลด

เทอมของ P_L สมการนี้จะเห็นได้เด่นชัดในเทอมของผลรวมการสูญเสีย I^2R ในสายส่งกำลังไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าแต่ละเส้นของระบบจะไม่สามารถคำนวณหาได้จนกระทั่งหลังจากขนาดและมุมเฟสของแรงดันเป็นที่ทราบแล้วทุกๆบัสในระบบไฟฟ้า สำหรับค่า P_L นั้นช่วงเริ่มแรกจะไม่ทราบและสมการ(2.12)จะนำมาใช้คำนวณไม่ได้ในสูตรการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเลือกบัสหนึ่งเป็นแสลคบัสที่มีค่า P_G ที่มีลักษณะไม่แน่นอน หลังจากนั้นปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้าจะถูกทำการแก้ปัญหาค่าแตกต่าง(แสลค)ระหว่างผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริง P ที่ไหลเข้าสู่ระบบที่บัสอื่นๆทั้งหมด และผลรวมของกำลังไฟฟ้าออกที่ทุก P บวกด้วยค่าการสูญเสีย I^2R ที่ถูกกำหนดไปในแสลคบัส สำหรับเหตุผลนี้จะทำให้

เจนเนอเรเตอร์บัสจะถูกพิจารณาเป็นแอสลคบัส ค่าความแตกต่างของผลรวมเมกกิวาร์ (total megavars) ที่ถูกจ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสและค่าเมกกิวาร์ที่รับโดยโหลดจะกำหนดให้เป็น

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n Q_{gi} - \sum_{i=1}^n Q_{di} \quad (2.13)$$

สมการนี้จะเห็นชัดเจนเมื่อเป็นบัสที่มีลักษณะเฉพาะดังสมการ(2.11)ที่แต่ละบัส i ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า ค่า Q_i จะสามารถประมาณค่าได้จากสมการ(2.7)หลังจากแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าได้แล้วจากนั้นปริมาณที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของสมการ(2.13)จะเป็นค่าที่รวมกันของค่าเมกกิวาร์ของไลน์ชาร์จิง จันท์คาปาซิเตอร์และรีแอคเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่บัส และมันจะเรียกว่าค่าความสูญเสีย IX^2 ที่เกิดขึ้นภายในรีแอคแตนซ์อนุกรม(series reactances)ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

มุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ไม่เป็นสแควคเคิลในข้อมูลอินพุตของการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเรียกว่า สเตจวารีเอเบิล(state variables)หรือ ดีเพ็นเด้นท์วารีเอเบิล(dependent variables)ซึ่งค่าเหล่านี้จะบอกให้ทราบถึงสถานะของระบบซึ่งจะเป็นผลมาจากปริมาณที่เป็นลักษณะเฉพาะของบัสทั้งหมด ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดค่าของสถานะที่เปลี่ยนไปทั้งหมดโดยการแก้ปัญหาของจำนวนของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในส่วนของข้อมูลอินพุตถ้ามีโวลท์เดจคอนโทรลบัสนับจำนวน n_g บัส(ไม่นับแอสลคบัส)ในระบบของ n บัสมันจะเป็น $(2n - n_g - 2)$ สมการที่ใช้แก้ปัญหา $(2n - n_g - 2)$ สำหรับสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในตารางที่ 2.1 สถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งจะถูกคำนวณ สถานะที่สมบูรณ์ของระบบจะสามารถหาได้และปริมาณทั้งหมดจะเป็นผลตามสภาวะที่เปลี่ยนแปลงและสามารถกำหนดได้ ปริมาณอย่างเช่น P_i และ Q_i ที่แอสลคบัส Q_i ที่โวลท์เดจคอนโทรลบัสแต่ละบัสและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย P_L ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ถูกควบคุม

ตารางที่ 2.1

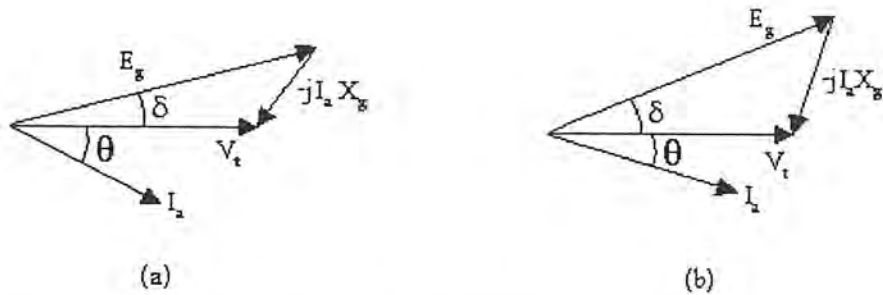
สรุปปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้า

ชนิดของบัส	จำนวนบัส	ค่าที่ทราบ	จำนวนของสมการ	จำนวนสภาวะการเปลี่ยนแปลงของ $\delta_i, V_i $
แอสลบบัส: $i=1$	1	$\delta_1, V_1 $	0	0
โวลต์แรงคอนโทรลลบบัส	n_k	$P_{ii}, V_i $	n_k	n_k
$(i = 2, \dots, n_k + 1)$				
โหลลบบัส ($i=n_k+2, \dots, n$)	$n - n_k - 1$	P_i, Q_i	$2(n - n_k - 1)$	$2(n - n_k - 1)$
รวม	n	$2n$	$2n - n_k - 2$	$2n - n_k - 2$

ฟังก์ชัน P_i และ Q_i ของสมการ (2.6) และ (2.7) เป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของสภาวะที่เปลี่ยนแปลงของ δ_i และ $|V_i|$ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยปกติจะใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำแล้วซ้ำอีกอย่างเช่นวิธีการของ เกาส์-ไซเดล วิธีของนิวตัน-ราฟสันและวิธีของคัลป์เปิด ซึ่งจะถูกพิจารณาต่อไปนี้ โดยวิธีของนิวตัน-ราฟสันและวิธีของคัลป์เปิด จะเป็นการแก้ปัญหาในรูปแบบของโพลาร์ฟอร์มของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจนกระทั่งค่ามิตแมทซ์ ΔP และ ΔQ ที่บัสทั้งหมดมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ยอมรับได้ ส่วนวิธีของเกาส์-ไซเดลจะเป็นการแก้ปัญหาในรูปแบบของโพลาร์ฟอร์มของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในลักษณะเรคแทงกูลาร์โคออร์ดิเนต จนกระทั่งค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าบัสจากการคำนวณรอบแรกและรอบอื่นๆแตกต่างกันน้อยมาก และทั้งสองวิธีการนี้จะเป็พื้นฐานของสมการบัสแอดมิตแตนซ์

2.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรจ่าย

เราจะศึกษากำลังจริง P โดยสมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ส่งกำลังภายใต้เงื่อนไขเสถียร ดังนั้นมุม δ จะอยู่ระหว่าง V_i ซึ่งเป็นแรงดันบัสระบบและ E_g ซึ่งเป็นแรงดันกำเนิด ถ้า E_g นำหน้า V_i เราจะได้แผนภาพเฟสเซอร์ ดังรูป 2.3(a)



รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ $|E_g|$ $|V_t|$ สำหรับ (a) มุม δ ขนาดเล็ก และ (b) มุม δ ใหญ่กว่าเพื่อแสดงการเพิ่มกำลังส่งตามที่เพิ่มขึ้น

ทั้งนี้ถ้ากำลังป้อนเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยการเปิดวาล์วให้กว้างขึ้นตามไอน้ำ หรือน้ำที่เข้าไปในกังหันขณะที่ $|E_g|$ เป็นค่าคงที่แล้ว ความเร็วของโรเตอร์จะเริ่มขึ้นเพิ่มขึ้นพร้อม ทั้งมุมระหว่าง E_g และ V_t จะเพิ่มขึ้นด้วย δ ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ I_a ใหญ่ขึ้นและ θ ต่ำลง ซึ่งเห็นได้จากการเปรียบเทียบรูป 2.3(a) และ 2.3(b) ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะส่งกำลังเข้าสู่วงจรจ่ายมากขึ้น และอินพุตจากตัวเคลื่อนกำลังจะเท่ากับเอาท์พุทสู่วงจรจ่ายนั้นอีกครั้ง ถ้าจะไม่คำนึงถึงการสูญเสีย คุณภาพ จะสร้างอีกครั้งด้วยความเร็วที่ตรงกันที่ความถี่ของบัสอนันต์ที่มี δ ใหญ่ขึ้น รูปที่ 2.3(b) เป็นการกระตุ้นสนามไฟฟ้ากระแสตรงและ $|E_g|$ ที่เหมือนกันดังรูปที่ 2.3(a) โดยมีกำลังเอาท์พุทเท่ากับ $|V_t| |I_a| \cos\theta$ ใหญ่กว่ารูป 2.3(b) และ δ ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องส่งกำลังสู่วงจรจ่ายเพิ่มขึ้น

ความไม่อิสระ (dependence) ของกำลังบนมุมกำลังได้แสดงโดยสมการที่กำหนด $P+jQ$ ที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเทอม δ ถ้า

$$V_t = |V_t| \angle 0^\circ \quad \text{และ} \quad E_g = |E_g| \angle \delta$$

ซึ่ง V_t และ E_g ได้แสดงไว้เป็นโวลท์ทวินิวทริลหรือต่อหน่วยจะได้

$$I_a = \frac{|E_g| \angle \delta - |V_t|}{jX_g} \quad (2.14)$$

และ

$$I_a^* = \frac{|E_g| \angle (-\delta) - |V_t|}{-jX_g} \quad (2.15)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 P + jQ &= V_t I_a^* \\
 &= \frac{|V_t| |E_g| \angle(-\delta) - |V_t|^2}{-jX_g} \\
 &= \frac{|V_t| |E_g| \angle(90 - \delta) - |V_t|^2 \angle 90^\circ}{X_g}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

ส่วนจริงของสมการเป็น

$$P = \frac{|V_t| |E_g|}{X_g} \cos(90 - \delta) = \frac{|V_t| |E_g|}{X_g} \sin \delta \tag{2.17}$$

และส่วนจินตภาพของสมการเป็น

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{|V_t| |E_g|}{X_g} \sin(90 - \delta) - \frac{|V_t|^2}{X_g} \\
 &= \frac{|V_t|}{X_g} (|E_g| \cos \delta - |V_t|)
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

เมื่อค่าเป็นโวลต์แทนที่เท่ากับ V_t และ E_g ในสมการ (2.17) และ (2.18) แล้วเราต้องกำหนดให้ V_t และ E_g เป็นค่าแรงดันระหว่างไลน์ทวินิวทรีล P และ Q เป็นปริมาณไฟฟ้าค่อเฟสอย่างไรก็ตามค่า V_t และ E_g จะเป็นค่า 3 เฟสทั้งหมดของ P และ Q ค่าเปอร์ยูนิตของ P และ Q ในสมการ (2.17) และ(2.18) คูณด้วยเมกกะโวลต์แอมแปร์ 3 เฟส หรือเมกกะโวลต์แอมแปร์เปอร์เฟสฐาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการกำลัง 3 เฟส หรือกำลังเปอร์เฟสทั้งหมด สมการ(2.17)แสดงความไม่เป็นอิสระของกำลังที่ส่งไปยังข่ายงานบนมุมกำลัง δ ถ้า $|E_g|$ และ $|V_t|$ เป็นค่าคงที่แล้วสมการ(2.17)จะแสดงว่า δ ต้องลดลงได้ ถ้า $|E_g|$ เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มการกระตุ้นสนามไฟฟ้ากระแสตรง ในสมการ(2.18) ที่มีค่า P คงที่ทั้งการเพิ่มใน $|E_g|$ และการลดใน δ หมายความว่า Q จะเพิ่มขึ้นด้วย ถ้าเป็นขวกอยู่แล้วหรือลดขนาดลงและคล้ายเป็นขวกบางครั้ง ถ้า Q เป็นลบมาก่อนการเพิ่มการกระตุ้นสนาม

สมการ(2.17)สามารถอธิบายเป็นกำลังที่ถ่ายโอนมาจากบัสหนึ่งไปยังอีกบัสหนึ่งในวงจรข่ายผ่านรีแอกแตนซ์ X ซึ่งจะเชื่อมบัสทั้งสองไว้ ถ้าแรงดันบัสเป็น V_1 และ V_2 และ δ เป็นมุมที่ V_1 นำหน้า V_2 อยู่จะได้

$$P = \frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta \quad (2.19)$$

เช่นเดียวกับสมการ(2.18) Q ที่ได้รับที่บัส 2 จะได้

$$Q = \frac{|V_2|}{X} (|V_1| \cos \delta - |V_2|) \quad (2.20)$$

จากสมการ (2.19) และ(2.20) เราจะเห็นว่าการเพิ่มใน δ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงใน P มากขึ้นกว่าใน Q เมื่อ Q มีขนาดเล็กลง ความแตกต่างนี้อธิบายได้เมื่อไซน์ δ เปลี่ยนมากขึ้นแค่ COS δ เปลี่ยนจำนวนเพียงเล็กน้อย ด้วยการเปลี่ยนใน δ เมื่อ δ น้อยกว่า 10° หรือ 15°

2.5 แบบจำลองระบบ

แบบจำลองระบบ เป็นการแทนอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวงจรสมมูลซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าอุปกรณ์นั้นมีการเชื่อมต่อและมีคุณสมบัติในระบบเป็นเช่นไร ดังนี้

2.5.1 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้า

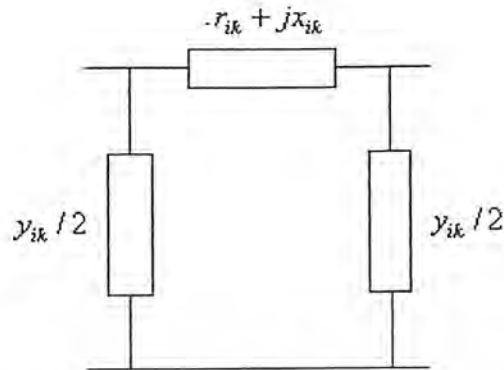
ในแบบจำลองสายส่งไฟฟ้านั้น ค่าของความต้านทานไฟฟ้า และค่าความต้านทานเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้า จะถูกรวมไว้ในส่วนที่ต่ออนุกรมของวงจรสมมูลแบบพายน์ และค่าของความจุไฟฟ้าจะถูกแบ่งอยู่ระหว่างส่วนที่ต่อขนาน ดังรูปที่ 2.4

แบบจำลองสายส่งไฟฟ้าในรูปจะแสดงสายส่งไฟฟ้าซึ่งต่ออยู่ระหว่าง 2 โหนด (node) คือ โหนด i และ k จะมีอิมพีแดนซ์ (impedance) ที่ต่ออนุกรมอยู่เป็น

$$z_{ik} = |z_{ik}| \exp(j\zeta_{ik}) = r_{ik} + jx_{ik} \quad (2.21)$$

และแอดมิตแตนซ์ขนาน (shunt admittance) บนด้าน i เป็น

$$y_{ik} = g_{ik} + jb_{ik} \quad (2.22)$$

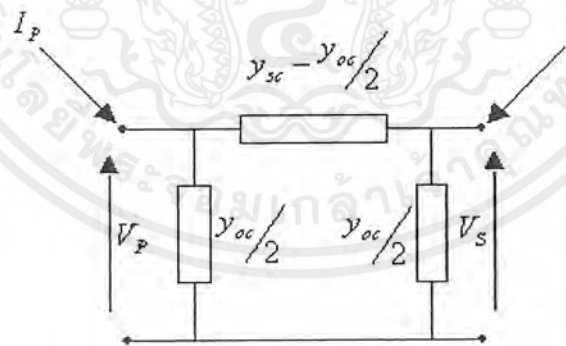


รูปที่ 2.4 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้า

2.5.2 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปกติ (On Nominal Ratio Transformer)

รูปแบบวงจรสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 เมื่อ y_{oc} เป็นส่วนกลับของอิมพีแดนซ์แม่เหล็ก (magnetizing impedance) z_{oc} ส่วน y_{sc} เป็นส่วนกลับของอิมพีแดนซ์รั่วไหล (leakage impedance) z_{sc} โดยที่ค่า z_{oc} และ z_{sc} ได้จากการทำทดสอบโดยวิธีเปิดวงจรและวิธีลัดวงจรตามลำดับ



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{sc} & -y_{sc} + \frac{y_{oc}}{2} \\ -y_{sc} + \frac{y_{oc}}{2} & y_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ y_{sc} เป็นแอดมิตแตนซ์รั่วไหล (Leakage admittance) และ y_{∞} เป็นแอดมิตแตนซ์แม่เหล็ก (Magnetizing admittance)

โดยทั่วไปแล้วค่าแอดมิตแตนซ์แม่เหล็กจะถูกตัดออกจากแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าและจะเพิ่มเข้าไปในภายหลังด้วยแอดมิตแตนซ์ที่ต่อขนานค่าน้อยๆที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในระบบที่เป็นเปอร์ยูนิค แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามารถทำการลดรูปให้เหลือเพียงแอดมิตแตนซ์รั่วไหล (Lumped admittance leakage) ระหว่างค้ำานปฐมภูมิและทุติยภูมิของบัสบาร์ (Bus bar) ได้

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทปได้ (Off Nominal Ratio Tap Setting Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ (turn ratio) เท่ากับ a และต่อเข้ากับโหนด i และโหนด k สามารถที่จะแสดงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติซึ่งต่ออนุกรมกับแอดมิตแตนซ์รั่วไหล หม้อแปลงไฟฟ้าปกติ ดังแสดงในรูป 2.6(a)

ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบปกติ ($a=1$) สมการ โหนดสำหรับวงจรในระบบเปอร์ยูนิคคือ

$$I_{ik} = y_{ik}V_i - y_{ik}V_k \quad (2.24)$$

$$I_{ki} = y_{ik}V_k - y_{ik}V_i \quad (2.25)$$

ในกรณีนี้ $I_{ik} = -I_{ki}$

เมื่อพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทปได้โดยให้แรงดันไฟฟ้าบนค้ำาน k ของหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติเป็น V_i สามารถเขียนได้ว่า

$$V_i = \frac{V_k}{a} \quad (2.26)$$

$$I_{ki} = y_{ik}(V_k - V_i) \quad (2.27)$$

$$I_{ik} = \frac{-I_{ki}}{a} \quad (2.28)$$

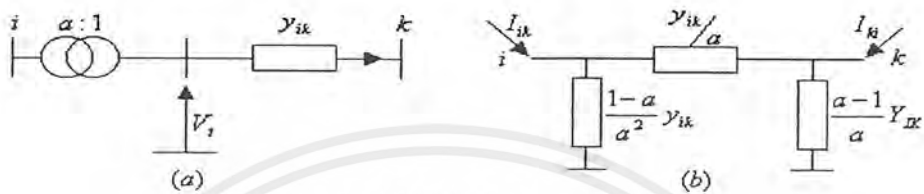
ถ้าจัด V_i จากสมการที่ (2.26) และ (2.27) จะได้

$$I_{ki} = y_{ik}V_k - \frac{y_{ik}V_i}{a} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{ik} = \frac{-y_{ik}V}{a} + \frac{y_{ik}V_i}{a^2} \quad (2.30)$$

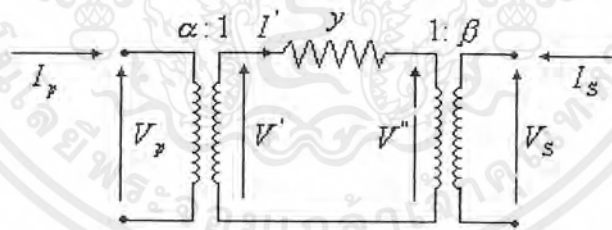
วงจรสมมูลแบบ π อย่างง่าย ๆ สามารถสรุปได้ตามสมการที่ (2.29) และ (2.30) สมาชิกแต่ละตัวสามารถจัดอยู่ในรูปของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ได้ดังรูปที่ 2.6(b)



รูปที่ 2.6 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทป

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลื่อนเฟส (Phase Shifting Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลื่อนเฟสดังรูปที่ 2.7 จะมีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นรูปเชิงซ้อน นอกจกนี้ค่า V_i จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติ และต้องแสดงความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนจำนวนรอบของกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลอย่างง่ายในระบบเปอร์ยูนิต สำหรับการคัปปลิง(coupling)

ระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดด้านทุติยภูมิ

$$V_p I_p^* = -V' I'^*$$

$$V_p = (a + jb)V' = \alpha V'$$

$$I_p^* = \frac{-I'^*}{(a + jb)}$$

$$I_p = \frac{-I'}{(a - jb)} = \frac{-I'}{\alpha^*}$$

ดังนั้น วงจรในรูปที่ 2.7 จึงมีเทิร์นเรโซ 2 ค่าที่แตกต่างกัน

$$\alpha_v = a + jb \quad \text{สำหรับแรงดันไฟฟ้า}$$

$$\alpha_i = a - jb \quad \text{สำหรับกระแส}$$

แก้สมการของจุดต่อกระแสกับวงจรที่ปรับปรุงแล้ว จะได้

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{I'}{\alpha_i} = \frac{(V' - V'')y}{\alpha_i} \\ &= \frac{(V_p / \alpha_v - V_s / \beta)y}{\alpha_i} = \frac{yV_p}{\alpha_v \alpha_i} - \frac{yV_s}{\alpha_i \beta} \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$I_s = \frac{I'}{\beta} = \frac{yV_p}{\alpha_v \beta} - \frac{yV_s}{\beta^2} \quad (2.32)$$

ดังนั้นรูปแบบทั่วไปของแอดมิตแตนซ์สำหรับวงจรหนึ่งเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมทั้งการตั้งเฟสเป็น

$$[y] = \begin{bmatrix} \frac{y}{\alpha_v \alpha_i} & \frac{-y}{\alpha_i \beta} \\ \frac{-y}{\alpha_v \beta} & \frac{y}{\beta^2} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

2.6 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

สมการที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้เป็นสมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของโหลดของโหนดของระบบไฟฟ้ากำลังสมการสำคัญที่ใช้มีสองสมการคือสมการหาค่าไฟฟ้าและสมการหาลำดับไฟฟ้า

สมการไฟฟ้าที่เข้าบัส k ใดๆในระบบไฟฟ้ากำลังมีความสัมพันธ์กับศักดาไฟฟ้าและกระแส
ดังนี้

$$S_k = V_k I_k^* \quad (2.34)$$

V_k = ศักดาไฟฟ้าที่บัส

I_k = กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส

สมการที่ (2.34) เป็นสมการกำลังไฟฟ้าที่หาจากสมมติฐานที่ว่า กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ มีค่าเป็นบวกเสมอ สำหรับแลกกิงโหลด (lagging load) หรือ I_k ตามหลังเวกเตอร์ V_k หรือบางครั้งใช้ $S_k = V_k I_k$ แต่เป็นสมการกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนสมมติฐานที่ว่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเป็นลบสำหรับแลกกิงโหลด ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจการใช้สมการ(2.34)ให้ถูกต้องด้วยว่าขึ้นอยู่กับสมมติฐานอะไร สำหรับสมการกำลังไฟฟ้าที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะใช้สมการ (2.34)โดยใช้สมมติฐานที่ว่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเป็นบวกสำหรับแลกกิงโหลด

กำลังไฟฟ้าในสมการ(2.34)เป็นกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าระบบค่ากำลังไฟฟ้าในรูปแบบเป็นเปอร์เซ็นต์ทั้งหมด

สมการศักดาไฟฟ้าที่บัส k ใดๆสามารถหาได้โดยพิจารณาจากสมการ (2.34)และหากระแสไฟฟ้าได้

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (2.35)$$

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* I_k \quad (2.36)$$

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (2.37)$$

จากสมการแมทริกซ์ $[I_{Bus}] = [Y_{Bus}][V_{Bus}]$ สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าบัส k ใดๆคือ I_k ได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่มี n บัส

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kn}V_n = \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \quad (2.38)$$

แทนค่ากระแส I_k ในสมการ (2.38) เข้าไปในสมการที่ (2.37) ได้

$$Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kk}V_k + \dots + Y_{kn}V_n = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (2.39)$$

จัดสมการ(2.39)ได้ใหม่

$$Y_{kk}V_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - (Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{k(k-1)}V_{k-1} + Y_{k(k+1)}V_{k+1} + \dots + Y_{kn}V_n) \quad (2.40)$$

ศักดาไฟฟ้าที่บัสใดๆ

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1, i \neq k}^n Y_{ki}V_i \right] \quad (2.41)$$

สมการที่(2.41) เป็นสมการหาศักดาไฟฟ้าบัส k ใดๆสมการนี้เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าศักดาไฟฟ้าของบัสในระบบไฟฟ้ากำลังจึงไม่ใช่เรื่องง่ายแบบแทนค่าสูตรคณิตศาสตร์ การแก้สมการเพื่อหาศักดาไฟฟ้าบัสจะกล่าวไว้ในตอนต่อไป

กำลังไฟฟ้าในสมการที่(2.36)สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในเทอมของศักดาไฟฟ้าบัสและแอดมิตแตนซ์ของระบบได้โดยแทนค่า I_k ในสมการที่(2.38) เข้าไปในสมการที่(2.36)จะได้

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* \left[\sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \right] \quad (2.42)$$

กำลังไฟฟ้าจริง $P_k = \text{Re} \left[V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \right] \quad (2.43)$

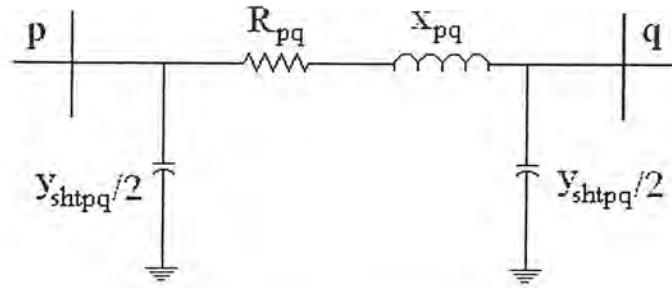
กำลังไฟฟารีแอกทีฟ $Q_k = -\text{Im} \left[V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \right] \quad (2.44)$

2.7 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลและกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลง

ภายหลังจากที่คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ แล้วสามารถคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าที่ไหล และกำลังสูญเสียในสายส่ง และหม้อแปลงต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.7.1 กำลังไฟฟ้าที่ไหลและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง

พิจารณาสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส p และ q ดังรูปที่ 2.8



R_{pq} คือ ความต้านทานของสายส่ง pq

X_{pq} คือ อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่ง pq

Y_{shtpq} คือ โลนชาร์จิงแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง pq

รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลพายน์ที่ใช้แทนสายส่ง

กระแสไฟฟ้าที่บัส p (I_p) คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i_{pq} &= i_{line} + i_{charging} \\ &= (V_p - V_q) \cdot y_{serpq} + V_p \cdot \frac{y_{shtpq}}{2} \end{aligned} \quad (2.46)$$

โดยที่ i_{line} คือ กระแสที่ไหลผ่านสายส่ง pq

$i_{charging}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ลงสู่พื้นดินตามโลนชาร์จิง

V_p และ V_q คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส p และ q ตามลำดับ

y_{serpq} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรมของสายส่ง pq มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{R_{pq} + jX_{pq}}$

$\frac{y_{shtpq}}{2}$ คือ ครึ่งหนึ่งของค่าโลนชาร์จิงแอดมิตแตนซ์ทั้งหมดของสายส่ง pq

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq จากบัส p ไปสู่บัส q คำนวณได้ดังนี้

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* \cdot i_p \quad (2.47)$$

แทนค่า i_p จากสมการที่ (2.46) ลงในสมการที่ (2.47) จะได้ว่า

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* \cdot (V_p - V_q) \cdot y_{serpq} + V_p^* \cdot V_p \cdot \frac{y_{shtpq}}{2} \quad (2.48)$$

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^* \cdot (V_q - V_p) \cdot y_{serpq} + V_q^* \cdot V_q \cdot \frac{y_{shtpq}}{2} \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

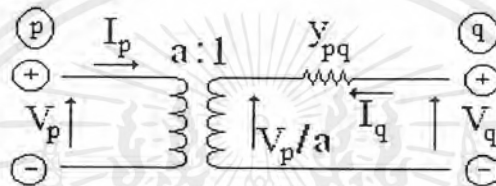
ในการทำงานเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq จากบัส q ไปสู่อบัส p คำนวณได้ดังนี้

กำลังสูญเสียในสายส่ง pq มีค่าเท่ากับ ผลรวมทางพีชคณิตของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส p ไปสู่อบัส q และที่ไหลจากบัส q ไปสู่อบัส p ดังนี้

$$P_{loss(pq)} = P_{pq} + P_{qp} \quad (2.50)$$

2.7.2 กำลังไฟฟ้าที่ไหลและสูญเสียในหม้อแปลง

พิจารณาวจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.9



a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง

y_{pq} คือ ค่าแอดมิแตนซ์ของหม้อแปลง

รูปที่ 2.9 แบบจำลองของหม้อแปลง

กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ไปสู่อบัส q คือ

$$P_{pq} - iQ_{pq} = \left(\frac{1}{a^*}\right) \cdot V_p^* \cdot \left[\frac{1}{a} \cdot V_p - V_q\right] \cdot y_{pq} \quad (2.51)$$

ในการทำงานเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส q ไปสู่อบัส p คือ

$$P_{qp} - iQ_{qp} = V_q^* \cdot \left[V_q - \frac{V_p}{a}\right] \cdot y_{pq} \quad (2.52)$$

สำหรับกำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า pq คำนวณได้จากสมการที่ (2.50) ทำงานเดียวกับสายส่ง

2.8 การแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

เนื่องจากการแก้ปัญหาค่าไหลของกำลังไฟฟ้าไม่ใช่เรื่องง่ายเพราะสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น การจำแนกว่าระบบใดมีสมการเป็นเชิงเส้นหรือไม่ให้พิจารณาจากสมการที่ (2.53) ซึ่งเป็นสมการทั่วไป n สมการที่ต้องการทราบค่า x_1, x_2, \dots, x_n

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\
 &\vdots \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_3
 \end{aligned}
 \tag{2.53}$$

สมการที่(2.53)เป็นเชิงเส้นก็ต่อเมื่อมีคุณสมบัติ 2 ประการดังนี้

$$f(ax) = af(x) \tag{2.54}$$

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2) \tag{2.55}$$

ถ้าสมการใดไม่มีคุณสมบัติเป็นไปตามสมการที่ (2.54)และ(2.55) ก็ถือว่าเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

วิธีการแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีด้วยกันหลายวิธีแต่วิธีการที่จะกล่าวถึงในที่นี้ใช้เพียงสามวิธี และเป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยซึ่งได้แก่ วิธีของเกาส์-ไชเดิล, วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และวิธีของคิคป์เปิด ในทางปฏิบัติไม่ใช้วิธีของเกาส์-ไชเดิลเพราะวิธีนี้ใช้เวลาคอมพิวเตอร์มาก ส่วนวิธีของนิวตัน-ราฟสัน และ วิธีคิคป์เปิด ใช้ได้ดีในทางปฏิบัติและความเร็วในการให้คำตอบก็ไม่ได้ช้าไปกว่าวิธีอื่นใหม่ๆที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆจนเกินไป และยังเป็นที่ยอมรับและใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าแต่ละวิธีจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

3.1 วิธีของเกาส์-ไซเดิล (Gauss-Seidle Method)

ความซับซ้อน การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง มีสาเหตุมาจากความแตกต่างของชนิดข้อมูลที่ระบุไว้ตามบัสชนิดต่างกัน การแก้ปัญหาจุดต่อของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าตามกระบวนการทำซ้ำ (iterative) โดยกำหนดค่าโดยประมาณ ค่าแรงดันบัสที่ไม่รู้และคำนวณค่าใหม่ ให้แรงดันบัสแต่ละตัวจากค่าประมาณที่บัสตัวอื่นๆกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ระบุหรือขนาดแรงดัน ค่าแรงดันชุดใหม่กำหนดให้แต่ละบัสใช้คำนวณแรงดันบัสชุดอื่นที่ยังมีอยู่ การคำนวณแรงดันชุดใหม่แต่ละชุดเรียกว่า การทำซ้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการซ้ำๆกันจนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงบัสที่แต่ละบัสน้อยกว่าค่าสูงสุดที่ระบุไว้

เราจะตรวจสอบการแก้ปัญหาตามการแสดงแรงดันของบัสตามฟังก์ชันของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ส่งเข้าสู่บัสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือจ่ายไปยังโหลดที่เชื่อมกับบัส แรงดันที่คำนวณหรือประมาณค่าได้ก่อนที่บัสอื่น และเซตพีและมิวชวลแอดมิตแดนซ์ของโหนดก่อน โดยการอนุพันธ์พื้นฐานตามกฎสมการวงจรจ่ายของโหลดทั้งนี้จะอนุพันธ์สมการสำหรับระบบ 4 บัส และเขียนสมการทั่วไปภายหลังด้วยการกำหนดบัสสวิงเป็นหมายเลข 1 และการคำนวณเริ่มด้วยบัส 2 ถ้า P_2 และ Q_2 เป็นกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟตามที่กำหนดไว้ไหลเข้าสู่ระบบที่บัส 2 แล้ว

$$V_2 I_2^* = P_2 + jQ_2 \quad (3.1)$$

จาก I_2 ได้แสดงเป็น

$$I_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} \quad (3.2)$$

และในเทอมของเซตพีและมิวชวลแอดมิตแดนซ์โหนดซึ่งจะเคลื่อนที่กำเนิดไฟฟ้า และเมื่อกระแสไหลเข้าสู่แต่ละโหนดได้แสดงตามสมการ (3.2)

$$\frac{P_{2,sch} - jQ_{2,sch}}{V_2^*} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (3.3)$$

V_2 จะได้

$$V_2 = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_{2,sch} - jQ_{2,sch}}{V_2^*} - (Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4) \right] \quad (3.4)$$

สมการ (3.4) จะให้ค่า V_2 ที่ถูกต้องตาม P_2 และ Q_2 ที่กำหนดไว้ เมื่อค่าโดยประมาณเริ่มต้น แทนที่นิพจน์แรงดันที่ด้านขวาของสมการ ค่า V_2 ที่คำนวณของ V_2 และค่า V_2 โดยประมาณจะไม่เป็นผลโดยการแทนที่การผัน (conjugate) ของค่า V_2 ที่คำนวณให้ V_2^* ในสมการ (3.4) เพื่อคำนวณค่า V_2 บัสตัวอื่น อย่างไรก็ตามค่าอื่นผลลัพธ์จะแน่นอนที่สุด หลังจากการคำนวณซ้ำกันหลายครั้ง และเป็นค่า V_2 ที่ถูกต้อง ที่มีค่าประมาณไม่เกี่ยวข้องกับกำลังที่ตามค่านี้อาจไม่เป็นผลลัพธ์ของ V_2 ตามเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระบุไว้ เนื่องจากแรงดันที่ขึ้นอยู่กับค่าการคำนวณ V_2 เป็นค่าประมาณของแรงดันที่บัสตัวอื่น และยังไม่ทราบแรงดันจริง การคำนวณ V_2 ทั้ง 2 วิธีวิธีที่ 2 เหมือนกับวิธีที่ 1 ยกเว้นความถูกต้องของ V_2^* ได้ถูกแนะนำไว้ที่แต่ละบัสก่อนจะเริ่มทำตัวต่อไป

สำหรับตอนนี้เราจะสมมติให้บัส 3 และบัส 4 เป็น โหลดบัสที่รู้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในทำนองเดียวกันสมการ (3.4) อาจจะเขียนสำหรับแต่ละบัส ดังนั้นที่บัส 3 เราจะได้

$$V_3 = \frac{1}{Y_{33}} \left[\frac{P_{3,sch} - jQ_{3,sch}}{V_3^*} - (Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{34}V_4) \right] \quad (3.5)$$

ถ้าทำให้ส่วนของค่าจริงและส่วนจินตภาพที่เท่ากันของสมการ (3.4) และ (3.5) และสมการที่คล้ายกันของบัส 4 จะได้สมการหกสมการในหกสภาวะที่เปลี่ยนแปลงจาก δ_2 ถึง δ_4 และ $|V_2|$ ถึง $|V_4|$ แต่อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาสำหรับทิศทางแรงดันคอมเพล็กซ์จากสมการที่ปรากฏอยู่ขบวนการแก้ปัญหา โดยการทำไอเทอเรชันหรือการคำนวณซ้ำแล้วซ้ำอีกบนพื้นฐานค่าสเกลเดิลของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ บัส 2, 3 และบัส 4 นั้นแรงดันสเกลเดิลของแอสลคบัส $V_1 = |V_1| \angle \delta_1$ และแรงดันเริ่มต้นจะประมาณได้ $V_2^{(0)}$, $V_3^{(0)}$ และ $V_4^{(0)}$ ที่บัสต่างๆ

การแก้ปัญหาของสมการ (3.4) จะกำหนดให้แรงดันที่ถูกต้อง $V_2^{(1)}$ คำนวณจาก

$$V_2^{(1)} = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_{2,sch} - jQ_{2,sch}}{V_2^{(0)*}} - (Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3^{(0)} + Y_{24}V_4^{(0)}) \right] \quad (3.6)$$

ในแต่ละปริมาณทั้งหมดในส่วนทางด้านขวามือของสมการจะมีลักษณะที่มีค่าคงที่หรือการประมาณค่าเริ่มต้น ค่าคำนวณ $V_2^{(1)}$ และค่าประมาณ $V_2^{(0)}$ จะไม่สามารถนำมาพิจารณาได้ ซึ่งถ้าต้องการที่จะทำให้นำนามาพิจารณาได้นั้นต้องมีค่ามุมที่ถูกต้องหลังจากการทำไอเทอเรชันหลายๆรอบและจะทำให้ค่า V_2 ที่เป็นแรงดันประมาณมีค่าถูกต้อง แต่ถ้าไม่มีการพิจารณากำลังไฟฟ้าที่บัสอื่น ค่าที่ได้มานี้จะไม่เป็นค่าคำนวณของ V_2 สำหรับเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามแรงดันคำนวณของ V_2 วิธีนี้จะเป็นการประมาณค่า $V_3^{(0)}$ และ $V_4^{(0)}$ ที่บัสอื่นๆ และแรงดันไฟฟ้าจริงจะยังไม่ทราบ

แรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องที่หาได้ของแต่ละบัสจะถูกใช้คำนวณค่าแรงดันที่ถูกต้องที่บัสถัดไป เพราะฉะนั้นการแทนค่า $V_2^{(1)}$ ในสมการ (3.5) เราจะได้ค่าการคำนวณครั้งที่ 1 ที่บัส 3 คือ

$$V_3^{(1)} = \frac{1}{Y_{33}} \left[\frac{P_{3,sch} - jQ_{3,sch}}{V_3^{(0)}} - (Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2^{(1)} + Y_{34}V_4^{(0)}) \right] \quad (3.7)$$

ขบวนการทำไอเทอเรชันที่บัส 4 และที่แต่ละบัสจะต่อเนื่องกันทั้งระบบ(ยกเว้นที่แสดงขีด) ที่จะทำให้การทำไอเทอเรชันครั้งแรกสมบูรณ์ในค่าที่คำนวณจะถูกหาในแต่ละสภาวะที่เปลี่ยนแปลง ถัดจากนั้นขบวนการทั้งหมดจะถูกทำซ้ำออกมาซ้ำๆกันจนกระทั่งค่าความถูกต้องของแรงดันไฟฟ้าที่ทุกๆบัสมีค่าน้อยกว่าดัชนีความแม่นยำที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้นี้ ขบวนการที่ใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าวิธีการนี้จะเป็นวิธีการของ เกาส์-ไซเดล ไอเทอเรทีฟ (Gauss-Seidel iterative)

การรวมตามการแก้ปัญหาอาจเกิดความผิดพลาดได้ ถ้าแรงดันแตกต่างจากค่าที่ถูกต้อง ถ้าเริ่มต้นมีขนาดที่เหมาะสมและเฟสไม่แตกต่างกันมากเกินไป การแก้ปัญหาที่ไม่ต้องการมักจะตรวจสอบได้อย่างง่ายดายด้วยผลที่แรงดันของระบบไม่ปกติ มีย่านในเฟสกว้างกว่า 45° และความแตกต่างระหว่างโกลด์กันน้อยกว่าประมาณ 10° ซึ่งมักจะมีจำนวนน้อยกว่า

ในทางปฏิบัติจะพยายามหลีกเลี่ยงการแก้ปัญหาที่ไม่ถูกต้อง ถ้าค่าเริ่มต้นมีขนาดที่เหมาะสมและไม่มีความแตกต่างกันมากนักในส่วนของมุมเฟสมันเป็นเรื่องปกติธรรมดาในทางปฏิบัติที่จะต้องทำการปรับเซ็ทการประมาณค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ยังไม่ทราบ ที่โหนดบัสทั้งหมดให้เท่ากับ $1.0 \angle 0^\circ$ เปรอ์ยูนิต การเริ่มต้นจะถูกเรียกว่า แพลทสตาร์ท (flat start) เพราะรูปแบบของแรงดันจะสมมติขึ้น

สำหรับระบบที่มี n บัส สมการทั่วไปที่ใช้คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส i ใดๆเมื่อ P และ Q เป็นค่าสเกลเดิลจะได้

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_{i,sch} - jQ_{i,sch}}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}V_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij}V_j^{(k-1)} \right] \quad (3.8)$$

หรือ

$$V_{i,acc}^{(k)} = (1 - \alpha)V_{i,acc}^{(k-1)} + \alpha V_i^{(k)} = V_{i,acc}^{(k-1)} + \alpha(V_i^{(k)} - V_{i,acc}^{(k-1)}) \quad (3.9)$$

เมื่อ $n \neq k$ แล้ว ค่าแรงดันบนด้านขวาของสมการเป็นค่าที่คำนวณได้ล่าสุดให้บัสที่ตรงกัน (หรือแรงดันประมาณ ถ้าไม่มีการทำซ้ำเกิดขึ้นที่เฉพาะบัสนั้น)

ตัวสคริปต์ (k) จะใช้แทนจำนวนของการทำไอเทอเรชันในส่วนที่แรงดันที่ถูกคำนวณ และ (k-1) จะบอกถึงจำนวนของขบวนการการทำไอเทอเรชันและเราจะพบว่าค่าของแรงดันที่อยู่ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านขวามือของสมการนี้จะเป็นค่าที่คำนวณอย่างทันทีทันใดทั้งหมด สำหรับบัสที่ลักษณะเดียวกัน (หรือค่าแรงดันประมาณ ถ้า k เป็น 1 และไม่มีการทำงานไอเทอเรชันที่บัสที่ทำการพิจารณา)

ตั้งแต่สมการ (3.8) จะใช้กับโหนดบัสที่ทราบค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่านั้น การพิจารณาเป็นสลับจะมีความจำเป็นที่บัสที่เป็นโหนดเดจคอนโทรลล์บัสซึ่งขนาดของแรงดันจะมีค่าคงที่

โวลต์เดจคอนโทรลล์บัส (Voltage-controlled buses) เมื่อขนาดของแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีลักษณะเฉพาะที่บัส i ใดๆ ส่วนประกอบที่เป็นค่าจริงและค่าจินตภาพของแรงดันของการทำไอเทอเรชันแต่ละรอบที่หาได้ในการคำนวณครั้งแรกสำหรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากสมการ(2.4)จะได้ว่า

$$Q_i = -\text{Im}\left\{V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j\right\} \quad (3.10)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$Q_i^{(k)} = -\text{Im}\left\{V_i^{(k-1)*} \left[\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(k)} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right]\right\} \quad (3.11)$$

ซึ่ง Im คือส่วนของค่าจินตภาพและตัวสลับคริปท์จะบอกถึงการทำไอเทอเรชัน กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ $Q_i^{(k)}$ จะประมาณได้จากสมการ (3.11) สำหรับค่าแรงดันที่บัสจะถูกแทนในสมการของ $Q_i^{(k)}$ และจะถูกแทนในสมการ (3.8) เพื่อที่จะหาค่าใหม่ของ $V_i^{(k)}$ องค์ประกอบของ $V_i^{(k)}$ ใหม่จะเป็นจำนวนเท่าของอัตราส่วนของขนาดค่าคงที่ $|V_i|$ กับขนาดของ $V_i^{(k)}$ ซึ่งถูกกำหนดตั้งสมการ (3.8) ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแรงดันคอมเพล็กซ์ที่ถูกต้อง

จากประสบการณ์พบว่าวิธีการของเกาส์-ไซเดล จะเป็นวิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สามารถแสดงจำนวนการทำซ้ำกันหลายครั้งเป็นที่ต้องการก่อนความถูกต้องของแรงดันอยู่ในดัชนีที่แน่นอนที่ยอมรับได้ ถ้าแรงดันที่ถูกต้องที่บัสเกือบจะแทนที่ค่าที่มาก่อนตั้งวิธีการคำนวณที่ได้จากบัสบัพจำนวนของการทำซ้ำที่ที่ต้องการจะลดลงอย่างมีเหตุผล แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาพื้นฐานทางด้านอุตสาหกรรมทุกวันนี้จะใช้สลับกับวิธีการของการไอเทอเรชันแบบนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าเชื่อถือ และยังเป็นวิธีการคำนวณที่รวดเร็วกว่าแบบเกาส์-ไซเดลมาก และยังมีเหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์มากอีกด้วย

3.2 วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method)

วิธีของนิวตัน-ราฟสัน ยุ่งยากกว่าทุกวิธีที่กล่าวมาแล้วแต่มีประสิทธิภาพสูงคือ ให้ผลลัพธ์ออกโดยใช้อรอบของการคำนวณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ วิธีของนิวตัน-ราฟสันใช้ทฤษฎีของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series) ช่วยในการแก้ปัญหา การขยายอนุกรมเทเลอร์ สำหรับฟังก์ชันตัวแปร 2 ตัว หรือมากกว่าเป็นวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน พื้นฐานในการแก้ปัญหาค่ากำลังไฟฟ้าซึ่งเราจะเริ่มอภิปรายการแก้ปัญหเฉพาะสมการ 2 สมการ และตัวแปร 2 ตัวแปรก่อน แล้วจึงวิเคราะห์ไปยังการแก้ปัญหของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

พิจารณาที่สมการฟังก์ชัน h_1 ของตัวแปรสองตัวแปรคือ x_1 และ x_2 เท่ากับค่าคงที่ b_1 โดย

$$g_1(x_1, x_2, u) = h_1(x_1, x_2, u) - b_1 = 0 \quad (3.12)$$

และสมการที่สองจะกล่าวถึงฟังก์ชัน h_2 ซึ่ง

$$g_2(x_1, x_2, u) = h_2(x_1, x_2, u) - b_2 = 0 \quad (3.13)$$

เมื่อ b_2 เป็นค่าคงที่เช่นกัน สัญลักษณ์ u ใช้แสดงแทนการควบคุมอิสระซึ่งเป็นการพิจารณาค่าคงที่ในเรื่องนี้ ในสมการ (2.9) และ (2.10) ฟังก์ชัน g_1 และ g_2 จะใช้เพื่ออำนวยความสะดวกที่จะให้พิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างค่าคำนวณของ h_1 และ h_2 และมันยังอ้างอิงถึงค่า b_1 และ b_2 ด้วย

สำหรับค่าเฉพาะของ u จะทำการประมาณการแก้ปัญหของสมการนี้เป็น $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ สับสคริปต์ที่เป็นศูนย์จะบ่งบอกถึงค่าที่เป็นการประมาณการเริ่มต้นและจะไม่ใช้การแก้ปัญหานั้นนั่นคือค่า x_1^* และ x_2^* จะทำการกำหนดค่าที่ถูกต้อง $\Delta x_1^{(0)}$ และ $\Delta x_2^{(0)}$ ซึ่งเป็นค่าที่ถูกรวมกับ $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ กับวิธีการแก้ปัญหาค่าที่ถูกต้องของ x_1^* และ x_2^* ดังนั้นจะได้ว่า

$$g_1(x_1^*, x_2^*, u) = g_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, u) = 0 \quad (3.14)$$

$$g_2(x_1^*, x_2^*, u) = g_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, u) = 0 \quad (3.15)$$

ปัญหาในตอนนี้ก็คือการแก้ปัญหาค่า $\Delta x_1^{(0)}$ และ $\Delta x_2^{(0)}$ ซึ่งจะทำการแก้ปัญหโดยการขยายสมการ (3.14) และ (3.15) ในรูปแบบของอนุกรมเทเลอร์เกี่ยวกับการแก้ปัญหซึ่งจะกำหนดว่า

$$g_1(x_1^*, x_2^*, u) = g_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, u) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \right|^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \right|^{(0)} + \dots = 0 \quad (3.16)$$

$$g_2(x_1^*, x_2^*, u) = g_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, u) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_1} \right|^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \right|^{(0)} + \dots = 0 \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งลำดับอนุพันธ์บางส่วนมากกว่า 1 ในอนุกรมของเทอมของการขยายซึ่งไม่ได้แสดงไว้ทั้งนี้เทอม $\partial f_1 / \partial x_1 |_{(0)}$ ซึ่งให้เห็นว่าส่วนอนุพันธ์ประเมินค่าให้ $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ ส่วนเทอมอื่นนั้นมีการประเมินค่าในทำนองเดียวกัน

ถ้าเราจะอนุพันธ์บางส่วนที่มากกว่า 1 ไว้แล้ว เขียนสมการ (3.16) และ (3.17) ใหม่ในรูปเมตริกซ์จะได้

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}}_{J^{(0)}} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - g_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, u) \\ 0 - g_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 - h_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, u) \\ b_2 - h_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, u) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

ซึ่งเมตริกซ์กำลังสองของการอนุพันธ์บางส่วนเรียกว่า จาโคเบียน J (jacobian) หรือ $J^{(0)}$ ซึ่งให้เห็นว่าค่าประมาณเริ่มแรก $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ ใช้คำนวณเศษของการอนุพันธ์บางส่วนได้ เมื่อเราให้ $g_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, u)$ เป็นค่าคำนวณของ g_1 ที่คำนวณให้ค่าประมาณ $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ แต่ค่า g_1 ที่คำนวณไว้นี้ไม่ใช่ค่าที่กำหนดจากสมการ (3.14) เว้นแต่ค่าประมาณ $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ จะถูกต้อง ก่อนหน้านั้นค่าเฉพาะของ g_1 ที่เป็นมิตแมทซ์ $\Delta g_1^{(0)}$ และกำหนดค่ามิตแมทซ์ $\Delta g_2^{(0)}$ ในลักษณะเดียวกัน ก็จะได้ระบบที่เป็นลักษณะเชิงเส้นของสมการมิตแมทซ์

$$J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta g_1^{(0)} \\ \Delta g_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

โดยการแก้สมการมิตแมทซ์ไม่ว่าจะโดยวิธีการ ไตรเองเกิดแฟลตทอโรเซชันหรือการหาค่าผกผันของจาโคเบียน(สำหรับปัญหาที่เล็กน้อย)เราจะสามารถกำหนด $\Delta x_1^{(0)}$ และ $\Delta x_2^{(0)}$ ได้ อย่างไรก็ตามตั้งแต่ตอนที่ได้ทำการขยายอนุกรมออกเป็นส่วนๆค่าเหล่านั้นจะรวมถึงค่าคาดคะเนเริ่มต้นไม่ใช้เป็นการกำหนดที่ถูกต้อง และจะต้องสมมติค่าประมาณค่าใหม่ $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ อีกครั้งหนึ่ง

$$x_1^{(0)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \quad (3.20)$$

$$x_2^{(0)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \quad (3.21)$$

และ

$$\begin{aligned} g_1(x_1, x_2, u) &= P_2(x_1, x_2, u) - (P_{g2} - P_{d2}) \\ &= 4|V_1||V_2| \sin \delta_2 + 0.6 = 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
 g_2(x_1, x_2, u) &= Q_2(x_1, x_2, u) - (Q_{g2} - Q_{d2}) \\
 &= 4|V_2|^2 - 4|V_1||V_2| \cos \delta_2 + 0.3 = 0
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

และจะทำการโอเพอเรนชันจนกระทั่งค่าที่ได้มามีขนาดเล็กน้อย ซึ่งจะเลือกค่านี้อ่าความเปลี่ยนแปลง $\varepsilon > 0$ จนกระทั่ง $|\Delta x_1|$ และ $|\Delta x_2|$ นั้นน้อยกว่าค่า ε และวิธีการต่างๆ เหล่านี้จะเป็นวิธีการของนิวตัน-ราฟสันที่จะนำมาแก้ไขปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า

3.2.1 วิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน

เพื่อประยุกต์วิธีนิวตัน-ราฟสัน เข้าสู่การแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า เราจึงเลือกแสดงแรงดันบัส และแอดมิตแดนซ์ไลน์แบบขั้วโพลาร์ (polar) หรือแบบเร็คแทงกูลาร์ (rectangular) ถ้าเราเลือกแบบโพลาร์ เมื่อ n ถูกปรับแก้ให้เท่ากับ i ดังในสมการ (2.6) และ (2.7) และเทอมเหล่านั้นจะถูกแยกออกมาพิจารณาได้ว่า

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^n |V_i V_n V_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{3.24}$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^n |V_i V_n V_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{3.25}$$

สมการนี้จะมีคามยุ่งยากในการที่จะอ้างอิงถึงมุมของแรงดันและขนาดของแรงดัน เทอมของ G_{ii} และ B_{ii} จะมาจากค่าของ Y_{ij} ในสมการ (2.1) และที่มุม $(\delta_n - \delta_i)$ เท่ากับศูนย์เมื่อ $n = i$ พิจารณาโวลต์เตจคอนโทรลบัสและพิจารณาบัสทั้งหมด (ยกเว้นแอสลคบัส) ที่เป็นโวลตบัสที่รู้ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของ P_{di} และ Q_{di} แอสลคบัสที่มีค่าที่ทราบคือค่ามุม δ_i และ $|V_i|$ และแต่ละบัสต่างๆที่อยู่ในระบบเน็ทเวิร์คจะมีตัวแปรอยู่สองตัวแปรคือ δ_i และ $|V_i|$ ที่จะนำไปใช้คำนวณในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า ค่า P_{di} และ Q_{di} ที่รู้จะมีค่าเป็นลบของค่าคงที่ b ดังแสดงในสมการ (3.12) และ (3.13) ที่ค่าประมาณของบัสที่ไม่ใช่แอสลคบัสแต่ละบัส ค่า δ_i และ $|V_i|$ จะนำไปตามค่าประมาณ $x_1^{(0)}$ และ $x_2^{(0)}$ ในการแก้ปัญหาค่ามิตแมทซ์ Δg ของสมการ (3.19) จะนำไปตามสมการ (2.8) และ (2.9) โดยจะเป็นการเขียนเพาเวอร์มิตแมทซ์สำหรับโวลตบัส i ได้ว่า

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc} \tag{3.26}$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,calc} \tag{3.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตอนนี้จะทำการเขียนสมการมิตแมทซ์สำหรับระบบที่มี 4 บัส และจะสามารถพิจารณาได้อย่างชัดเจนเมื่อทำการขยายสมการนี้เข้าสู่ระบบที่มีมากกว่า 4 บัส

สำหรับกำลังไฟฟ้าจริง P_i จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 \\ &+ \frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \frac{\partial P_i}{\partial |V_3|} \Delta |V_3| + \frac{\partial P_i}{\partial |V_4|} \Delta |V_4| \end{aligned} \quad (3.28)$$

ในส่วนของสามเทอมหลังจะสามารถเขียนใหม่โดยอ้างอิงกับขนาดของแรงดันของมันซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของมัน ดังนั้นซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 \\ &+ |V_2| \frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} + |V_3| \frac{\partial P_i}{\partial |V_3|} \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} + |V_4| \frac{\partial P_i}{\partial |V_4|} \frac{\Delta |V_4|}{|V_4|} \end{aligned} \quad (3.29)$$

รูปแบบของสมการจะมีประโยชน์มากซึ่งจะให้เห็นหลังจากนี้ สมการที่มีลักษณะคล้ายๆ กันจะสามารถเขียนในส่วนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q_i ได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 \\ &+ |V_2| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} + |V_3| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_3|} \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} + |V_4| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_4|} \frac{\Delta |V_4|}{|V_4|} \end{aligned} \quad (3.30)$$

บัสที่ไม่ใช่แอสลคบัสแต่ละบัสของระบบจะมีสมการอยู่สองสมการที่เหมือนกับสมการของ ΔP_i และ ΔQ_i โดยการรวบรวมจากสมการมิตแมทซ์ทั้งหมดในลักษณะรูปแบบของเวกเตอร์เมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_4| \frac{\partial P_2}{\partial |V_4|} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial P_4}{\partial |V_2|} & \dots & |V_4| \frac{\partial P_4}{\partial |V_4|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_4| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_4|} \\ \vdots & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial Q_4}{\partial |V_2|} & \dots & |V_4| \frac{\partial Q_4}{\partial |V_4|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_4 \\ \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_4|}{|V_4|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

จาโคเบียน
คอร์เรลชัน มิสแมทซ์

ซึ่งไม่สามารถที่จะรวมค่ามิสแมทซ์สำหรับค่าแอสคัลบัสได้ตั้งแต่ค่า ΔP_i และ ΔQ_i ที่เป็นค่าที่ไม่ได้กำหนดเมื่อค่า P_i และ Q_i ไม่ได้เป็นค่าสเกลเคลเราจะยกเลิกเทอมทั้งหมดที่กล่าวถึง $\Delta \delta_i$ และ $\Delta |V_i|$ จากสมการเพราะว่าค่าคอร์เรลชันนั้นเป็นศูนย์ทั้งคู่ที่แอสคัลบัส

การแบ่งแยกเทอมจากสมการ (3.31) จะเน้นไปที่ชนิดความแตกต่างทั้งสี่ของอนุพันธ์พาร์เซิลซึ่งจะเข้าไปสู่ตัวจาโคเบียน J องค์ประกอบของ J_{12} และ J_{22} จะมีจำนวนเป็นจำนวนเท่าของขนาดของแรงดันเพราะว่าผลลัพธ์จาโคเบียนมีความสมมาตรมาก ในการเลือกรูปแบบเช่นนี้จะใช้เอกลักษณ์ของ

$$\underbrace{|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|}}_{\text{องค์ประกอบของ } J_{12}} \times \underbrace{\frac{\Delta |V_j|}{|V_j|}}_{\text{คอร์เรลชัน}} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \times \Delta |V_j| \quad (3.32)$$

และค่าคอร์เรลชันจะกลายเป็น $\frac{\Delta |V_j|}{|V_j|}$ ซึ่งจะเป็นการแสดงที่ค่อนข้างจะเหมือน $\Delta |V_j|$ การแก้ปัญหาของสมการ (3.31) จะหาได้โดยการทำไอเทอเรชันดังนี้

- ค่าประมาณ $\delta_i^{(0)}$ และ $|V_i|^{(0)}$ สำหรับตัวแปรสแตก
- ใช้การประมาณมาคำนวณ

ค่า $P_{i,calc}^{(0)}$ และ $Q_{i,calc}^{(0)}$ จากสมการ (3.24) และ (3.25)

ค่ามิสแมทซ์ $\Delta P_i^{(0)}$ และ $\Delta Q_i^{(0)}$ และจากสมการ (3.26) และ (3.27) และองค์ประกอบของอนุพันธ์พาร์เซิล J

- แก้สมการ (3.31) สำหรับหาค่าคอร์เรลชันเริ่มต้น $\Delta \delta_i^{(0)}$ และ $\frac{\Delta |V_i|^{(0)}}{|V_i|^{(0)}}$
- ทำการรวมค่าคอร์เรลชันที่ทำการแก้ปัญหาแล้วเป็นค่าประมาณเริ่มต้นซึ่งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \delta_i^{(0)} \quad (3.33)$$

$$|V_i|^{(1)} = |V_i|^{(0)} + \Delta|V_i|^{(0)} = |V_i|^{(0)} \left(1 + \frac{\Delta|V_i|^{(0)}}{|V_i|^{(0)}} \right) \quad (3.34)$$

- ใช้ค่าใหม่ของ $\Delta\delta_i^{(1)}$ และ $\Delta|V_i|^{(1)}$ เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการทำไอเทอเรชันครั้งที่สองและครั้งต่อไปเรื่อยๆ

ในส่วนของเทอมต่างๆ ไปนั้นสูตรที่ปรับปรุงขึ้นให้ใช้ได้กับค่าเริ่มต้นของตัวแปรสเทจซึ่งก็คือ

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (3.35)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k)} \left(1 + \frac{\Delta|V_i|^{(k)}}{|V_i|^{(k)}} \right) \quad (3.36)$$

สำหรับระบบที่มี ลี บัส เมตริกซ์ย่อย J_{11} จะมีรูปแบบดังนี้

$$J_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

เพื่อที่จะทำให้อंकประกอบในสมการนี้เห็นเด่นชัดเป็นการง่ายที่จะหาโดยการทำให้เกิดความแตกต่างของค่าจำนวนของเทอมที่เหมาะสมในสมการ (3.24) เมื่อตัวแปร n เท่ากับค่า j ของเทอมโศชาน์ในการทำ ซัมเมชันของสมการ (3.24) ที่มีค่า δ_j และโดยการทำดิฟฟาริเชี่ยลที่เป็นเทอมเดี่ยวที่อ้างอิงถึง δ_j ซึ่งจะได้องค์ประกอบในแนวทแยง (off-diagonal) ของค่า J_{11}

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.38)$$

ในส่วนของด้านอื่นๆทุกเทอมในการทำซัมเมชันของสมการ (3.24) ซึ่งมี δ_i และตั้งนั้นองค์ประกอบทางแนวทแยงมุมของ J_{11} คือ

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^n |V_i V_n V_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเปรียบเทียบกับค่า Q_i ในสมการ (3.25) จะได้

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (3.40)$$

ในทำนองเดียวกัน จะทำการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับองค์ประกอบของเมตริกซ์ย่อย J_{12} ดังนี้

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^n |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} \quad (3.42)$$

การเปรียบเทียบกับสมการนี้สำหรับ $\partial Q_i / \partial \delta_i$ กับสมการ (3.24) สำหรับ P_i จะแสดงได้ว่า

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = P_i - |V_i|^2 G_{ii} \quad (3.43)$$

องค์ประกอบของเมตริกซ์ย่อย J_{12} จะหาได้ง่ายในการหาค่าครั้งแรกสำหรับการหาอนุพันธ์ของ $\partial P_i / \partial |V_j|$ และหลังจากนั้นคูณด้วย $|V_j|$ จะได้ว่า

$$|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_j| |V_i Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.44)$$

เปรียบเทียบกับสมการ (3.41) จะได้

$$|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = - \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (3.45)$$

ผลลัพธ์การใช้งานทั้งหมดนี้จะเป็นการลดการคำนวณที่กล่าวถึงในรูปแบบฟอร์มของจาโคเบียนตั้งแต่องค์ทางด้านแนวทแยงของ J_{12} ตอนนี้เป็นค่าลบขององค์ประกอบที่ตามกันใน J_{21} ซึ่งข้อเท็จจริงนี้จะไม่เห็นเด่นชัดถ้าไม่คูณ $\partial P_i / \partial |V_j|$ โดยขนาด $|V_j|$ ในสมการ (3.29) ในทำนองเดียวกันองค์ประกอบในแนวทแยงของ J_{12} จะถูกหาได้โดย

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_i| \left[2|V_i| G_{ii} + \sum_{n=1}^n |V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \right] \quad (3.46)$$

และการเปรียบเทียบกับสมการ (3.42) และ (3.43) จะได้สูตรว่า

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} + 2|V_i|^2 G_{ii} = P_i + |V_i|^2 G_{ii} \quad (3.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตอนสุดท้ายแล้ว องค์ประกอบแนวทแยงและแนวทแยงออฟของเมตริกซ์ย่อย J_{22} ของจาโคเบียนจะถูกกำหนดว่า

$$|V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_j| |V_i Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.48)$$

$$|V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} - 2|V_i|^2 B_{ii} = Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (3.49)$$

และเมื่อพิจารณาผลลัพธ์เข้าด้วยกันจะได้ว่าองค์ประกอบแนวทแยงออฟ (Off-diagonal elements) , $i \neq j$

$$M_{ij} \equiv \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \quad (3.50)$$

$$N_{ij} \equiv \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \quad (3.51)$$

องค์ประกอบแนวทแยง (Diagonal elements) , $i = j$

$$M_{ii} \equiv \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} \quad |V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -M_{ii} - 2|V_i|^2 B_{ii} \quad (3.52)$$

$$N_{ii} \equiv \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} \quad |V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = N_{ii} + 2|V_i|^2 G_{ii} \quad (3.53)$$

ความเกี่ยวข้องภายในระหว่างองค์ประกอบในเมตริกซ์ย่อยทั้งสี่ของจาโคเบียนจะเห็นได้ชัดเจนถ้าเรากำหนด และเขียนสมการ (3.31) ใหม่ในรูปแบบของ

$$\begin{bmatrix} M_{22} & M_{23} & M_{24} & N_{22} + 2|V_2|^2 G_{22} & -N_{23} & -N_{24} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & -N_{32} & N_{33} + 2|V_3|^2 G_{33} & -N_{34} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & -N_{42} & -N_{43} & N_{44} + 2|V_4|^2 G_{44} \\ \hline N_{22} & N_{23} & N_{24} & -M_{22} - 2|V_2|^2 B_{22} & M_{23} & M_{24} \\ N_{32} & N_{33} & N_{34} & M_{32} & -M_{33} - 2|V_3|^2 B_{33} & M_{34} \\ N_{42} & N_{43} & N_{44} & M_{42} & M_{43} & -M_{44} - 2|V_4|^2 B_{44} \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta\delta_4 \\ \Delta|V_2|/|V_2| \\ \Delta|V_3|/|V_3| \\ \Delta|V_4|/|V_4| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

ซึ่งจะต้องพิจารณา巴士ที่ไม่ใช่แอสลค巴士ทั้งหมดที่เป็นโหนด巴士 และต้องพิจารณาโวลท์เดจคอนโทรล巴士ด้วย

3.2.2 ขั้นตอนของวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) พอสรุปได้ดังนี้

1. คำนวณค่าของ $P_{i,calc}$ และ $Q_{i,calc}$ ที่ไหลเข้าในระบบ巴士 ให้ค่าขนาดแรงดันและมุมที่ระบุหรือค่าที่ประมาณสำหรับการทำซ้ำครั้งแรกหรือลำดับต่อไป
2. คำนวณ ΔP และ ΔQ ของทุก巴士
3. คำนวณค่าจาโคเบียน J (jacobian) ที่ใช้ขนาดแรงดันและมุมค่าประมาณหรือค่ากำหนดในสมการ การอนุพันธ์บางส่วนที่พิจารณาจากการอนุพันธ์ สมการ (3.24) และ (3.25)
4. ทำการอินเวอร์ทจาโคเบียนเมตริกซ์และคำนวณค่า $\Delta\delta_i$ และ $\Delta|V_i|$ ที่ทุก巴士
5. คำนวณ δ_i และ $|V_i|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta\delta_i$ และ $\Delta|V_i|$ กับค่าเดิม
6. ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1 และทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่ง ΔP และ ΔQ หรือ $\Delta\delta_i$ และ $\Delta|V_i|$ ทุกค่าน้อยกว่าค่าดัชนีที่ถูกต้องที่กำหนดไว้

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แอสลค巴士 และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โวลท์เดจคอนโทรล巴士สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.24) และ (3.25) นอกจากนี้การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างระดับแรงดันไฟฟ้าที่巴士

จำนวนของการทำซ้ำที่กำหนดจากวิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งใช้แอดมิตแดนซ์บัสมีจำนวนบัสอิสระ การคำนวณส่วนประกอบย่อยของจาโคเบียน ต้องใช้เวลาและมีเวลาหรือการทำซ้ำมากกว่าวิธีนิวตัน-ราฟสัน ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน มากกว่า

3.3 วิธีคัปเปิล (Decoupled Method)

3.3.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีคัปเปิล

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีของนิวตัน-ราฟสันนั้น จาโคเบียนเมตริกซ์จะถูกคำนวณในทุกๆรอบของการคำนวณ ส่วนในทางปฏิบัติจริงจาโคเบียนเมตริกซ์จะคำนวณแค่ 2-3 รอบ ซึ่งจะเพิ่มความเร็วในกระบวนการหาผลลัพท์ทั้งหมด จะหาผลลัพท์ท้ายสุดได้อย่างถูกต้อง โดยจะได้ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ยอมรับได้

เมื่อต้องการคำนวณระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ จะใช้วิธีการคำนวณวิธีอื่นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการคำนวณและลดหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ ในที่นี้จะใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีของคัปเปิล ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าทางวิศวกรรมจากวิธีของนิวตัน-ราฟสัน โดยมีข้อสังเกตในการใช้วิธีของคัปเปิลอยู่ 2 ข้อดังนี้

- การเปลี่ยนค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่บัส (θ) จะมีผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (P) ในสายส่งไฟฟ้าและคิดว่าการไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) ไม่เปลี่ยนแปลง
- การเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่บัส ($|V|$) จะมีผลต่อการไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) ในสายส่งไฟฟ้า และคิดว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (P) ไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาเรื่องการควบคุมการเปลี่ยนแปลงเฟสและขนาดของแรงดันไฟฟ้า จากข้อสังเกตแรกจะทำให้ $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}$ มีค่ามากกว่า $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i}$ มากสามารถประมาณค่าให้เป็นศูนย์ได้ ส่วนข้อ

สังเกตที่สองนั้น $\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|}$ มีค่ามากกว่า $\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|}$ มาก สามารถค่าให้เป็นศูนย์ได้เช่นเดียวกัน

เมื่อทำการประมาณค่าในจาโคเบียนเมตริกซ์จากการประมาณค่าข้างต้น จะทำให้โอเอเมนต์ (element) ของเมตริกซ์ย่อย J_{12} และ J_{21} เท่ากับศูนย์จะเหลือสมการเพียง 2 สมการแยกออกจากกันคือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} \\ \vdots & J_{11} & \vdots \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_4 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$\begin{bmatrix} |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_4| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_4|} \\ \vdots & J_{22} & \vdots \\ |V_2| \frac{\partial Q_4}{\partial |V_2|} & \dots & |V_4| \frac{\partial Q_4}{\partial |V_4|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_4|}{|V_4|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

สมการที่ (3.55) และ (3.56) เรียกว่าสมการคิเค็ปเปิด คือค่า $\Delta \delta$ ถูกคำนวณ โดยการใช้เพียงแค่ค่า ΔP เท่านั้น ในขณะที่ $\Delta |V|$ ถูกคำนวณ โดยการใช้เพียงแค่ค่า ΔQ

อย่างไรก็ตามเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ J_{11} และ J_{22} ยังคงสัมพันธ์กัน เพราะว่าอิเลเมนต์ของ J_{11} จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3.56) ในขณะที่ส่วนต่างๆของ J_{22} จะขึ้นอยู่กับมุมของแรงดันไฟฟ้าจากสมการ (3.55)

ดังนั้นทั้งสองสมการนี้จะคำนวณสลับกัน โดยใช้ผลลัพธ์จากการคำนวณล่าสุดจากสมการหนึ่งเพื่อหาผลลัพธ์ในอีกสมการหนึ่ง แต่วิธีนี้ยังคงต้องคำนวณและหาค่าอิเลเมนต์ของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ทั้งสองในทุกๆรอบของการคำนวณซึ่งทำให้การคำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ง่ายขึ้นโดยผลลัพธ์ที่ได้ยังมีค่าถูกต้องยอมรับได้ ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังที่ดีและถูกต้องสำหรับระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย

- ความแตกต่างของมุม $(\delta_i - \delta_j)$ ระหว่างบัสในระบบมีค่าน้อยกว่าคือ

$$\cos(\delta_i - \delta_j) = 1 \quad ; \quad \sin(\delta_i - \delta_j) = 0 \quad (3.57)$$

- ค่าซัสเซพแตนซ์ (susceptance) ของสายส่งไฟฟ้า B_{ij} มีขนาดใหญ่กว่าค่าคอนดักแตนซ์ (conductance) ของสายส่งไฟฟ้า G_{ij} หลายเท่า ดังนั้น

$$G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \ll B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3.58)$$

- ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ Q_i ที่ไหลเข้าบัส i ใดๆในระบบระหว่างที่อยู่ในสภาพการทำงานปกติ จะมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมาก ถ้าสายส่งไฟฟ้าทุกเส้นจากบัสนั้นถูกตัดวงจร ดังนั้น

$$Q_i \ll |V|^2 B_{ii} \quad (3.59)$$

การประมาณค่าเหล่านี้ทำให้ส่วนของจาโคเบียนเมตริกซ์ง่ายขึ้นจากสมการ (3.59) อิเลเมนต์ที่ไม่ได้อยู่ในแนวทแยงมุมหลักใน J_{11} และ J_{22} ถูกกำหนดเป็น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_j| \left| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \right| = -|V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.60)$$

แทนค่า $\sin(A+B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$ ในสมการ (3.60) จะได้

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_j| \left| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \right| = -|V_i V_j| \{B_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i) + G_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i)\} \quad (3.61)$$

เมื่อ $B_{ij} = |Y_{ij}| \sin \theta_{ij}$ และ $G_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij}$ และจากการประมาณค่าด้านบนจะได้อิเลเมนต์ที่ไม่ได้อยู่ในแนวทแยงมุมหลักใน J_{11} และ J_{22} ดังนี้

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_j| \left| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \right| = -|V_i V_j| B_{ij} \quad (3.62)$$

จาก $Q_i \ll |V|^2 B_{ii}$ จะได้อิเลเมนต์ที่อยู่ในแนวทแยงมุมหลักใน J_{11} และ J_{22} ดังนี้

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = |V_i| \left| \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} \right| = -|V_i|^2 B_{ii} \quad (3.63)$$

เมื่อนำการประมาณค่าด้านบนมาแทนค่าในสมการ (3.62) และ (3.63) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ J_{11} และ J_{22} จะได้เมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} -|V_2 V_2| B_{22} & -|V_2 V_3| B_{23} & -|V_2 V_4| B_{24} \\ -|V_2 V_3| B_{32} & -|V_3 V_3| B_{33} & -|V_3 V_4| B_{34} \\ -|V_2 V_4| B_{42} & -|V_3 V_4| B_{43} & -|V_4 V_4| B_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

และ

$$\begin{bmatrix} -|V_2V_2|B_{22} & -|V_2V_3|B_{23} & -|V_2V_4|B_{24} \\ -|V_2V_3|B_{32} & -|V_3V_3|B_{33} & -|V_3V_4|B_{34} \\ -|V_2V_4|B_{42} & -|V_3V_4|B_{43} & -|V_4V_4|B_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta|V_2|}{|V_2|} \\ \frac{\Delta|V_3|}{|V_3|} \\ \frac{\Delta|V_4|}{|V_4|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

นำค่าแรงดันไฟฟ้า ในเมตริกซ์สัมประสิทธิ์จากสมการ (3.65) แยกแวกคูณกับเมตริกซ์ความต่างของขนาดแรงดันไฟฟ้า เมื่อได้ผลลัพธ์แล้วหารด้วย $|V_2|$ ผลลัพธ์จะได้

$$-B_{22}\Delta|V_2| - B_{23}\Delta|V_3| - B_{24}\Delta|V_4| = \frac{\Delta Q_2}{|V_2|} \quad (3.66)$$

สัมประสิทธิ์ในสมการนี้เป็นค่าคงที่ซึ่งเท่ากับค่าลบของซัพเซฟแดนซ์ในแฉวของ Y_{bus} ที่เกี่ยวข้องกับบัสที่สอง ส่วนแฉวอื่นในสมการ (3.65) ก็คิดเหมือนจะได้ว่า $\frac{\Delta Q_i}{|V_i|}$ ที่บัส i ดังนั้น

สมการ (3.65) สมสามารถเปลี่ยนเป็นค่าคงที่ทั้งหมดได้โดยทราบค่าซัพเซฟแดนซ์ของ Y_{bus} ในทำนองเดียวกันสามารถดัดแปลงสมการ (3.64) โดยทำแฉวคูณกับเมตริกซ์ความต่างของมุมแล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$-|V_2|B_{22}\Delta\delta_2 - |V_3|B_{23}\Delta\delta_3 - |V_4|B_{24}\Delta\delta_4 = \frac{\Delta P_2}{|V_2|} \quad (3.67)$$

สัมประสิทธิ์ในสมการนี้สามารถทำในทำนองเดียวกับสมการ (3.65) โดยกำหนดให้ $|V_2|$, $|V_3|$ และ $|V_4|$ เท่ากับ 1.0 เปรอ์ยูนิตในด้านซ้ายมือของสมการก็จะได้ค่า $\frac{\Delta P_2}{|V_2|}$ ทำแบบนี้กับทุกแฉวของสมการ (3.64) ก็จะไ้ระบบคัพเปิด 2 ระบบของสมการสำหรับเครือ่ข่าย 4 บัสดังนี้

$$\begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{23} & -B_{24} \\ -B_{32} & -B_{33} & -B_{34} \\ -B_{42} & -B_{43} & -B_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta\delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_2}{|V_2|} \\ \frac{\Delta P_3}{|V_3|} \\ \frac{\Delta P_4}{|V_4|} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{23} & -B_{24} \\ -B_{32} & -B_{33} & -B_{34} \\ -B_{42} & -B_{43} & -B_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta|V_2| \\ \Delta|V_3| \\ \Delta|V_4| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_2}{|V_2|} \\ \frac{\Delta Q_3}{|V_3|} \\ \frac{\Delta Q_4}{|V_4|} \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

โดยทั่วไปเมตริกซ์ B จะสมมาตรกับอีเลเมนต์ต่างๆจะไม่เท่ากับศูนย์ และเป็นจำนวนจริง ซึ่งเป็นค่าลบของค่าซัพเพแดนซ์ ของ Y_{bus} ดังนั้นเมตริกซ์ B จึงสร้างได้ง่าย โดยการคำนวณเพียงครั้งเดียวตอนเริ่มต้นที่โวลต์เดจคอนโทโรลลัส โดยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะไม่ทราบค่าและ $\Delta|V|$ มีค่าเท่ากับศูนย์ แถวและหลักที่เกี่ยวข้องกับบัสจะไม่นำมาคำนวณ

3.3.2 ขั้นตอนของวิธีดีคัปเปิล (Decoupled Method) พอสรุปได้ดังนี้

1. คำนวณค่าเริ่มต้น $\frac{\Delta P}{|V|}$
2. หาค่า $\Delta\delta$ จากสมการ (5.14)
3. ปรับเปลี่ยนค่ามุม δ แล้วนำไปคำนวณ $\frac{\Delta Q}{|V|}$
4. แก้สมการ (3.69) เพื่อหาค่า $\Delta|V|$ แล้วปรับเปลี่ยนค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า $|V|$
5. กลับไปคำนวณสมการ (3.68) ทำซ้ำรอบของการคำนวณต่อไปจนกระทั่งค่า ΔP และ ΔQ ทั้งหมดอยู่ในค่าความผิดพลาดที่กำหนดไว้

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า โดยวิธีดีคัปเปิลนี้จะทำให้การหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารวดเร็วขึ้น ซึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้ก็ถูกต้องเป็นที่ยอมรับได้

บทที่ 4

การออกแบบ และวิธีการใช้โปรแกรม

จากทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 วิธีที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า คือ วิธีของเกาส์-ไซเดิล, วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และวิธีคิป์เปิด ในบทนี้ได้สรุปเป็นตารางสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและวิธีการแก้ปัญหา พร้อมทั้งโพลซาร์จการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนี้

ตารางที่ 4.1 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและวิธีการแก้ปัญหา

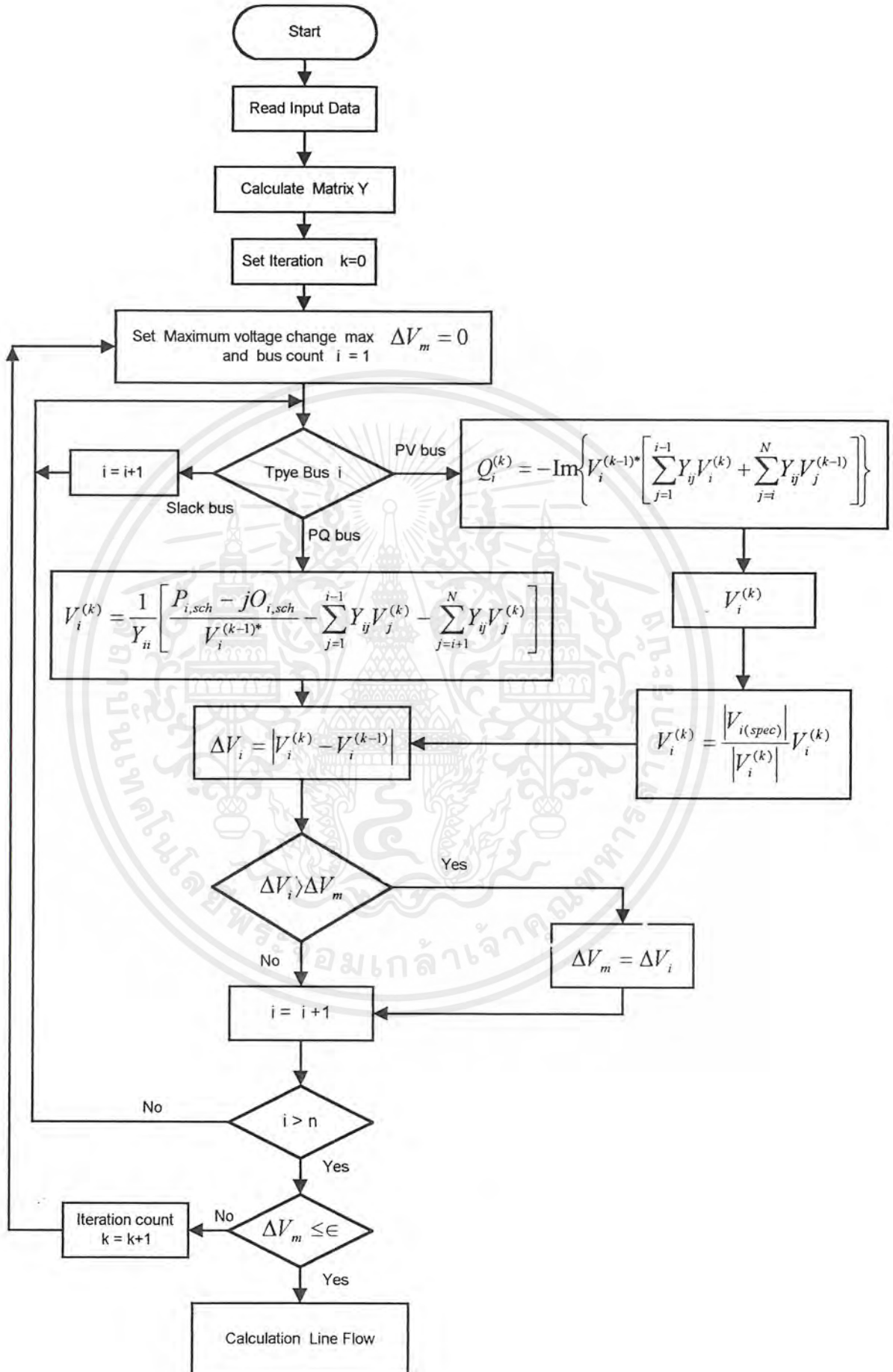
Power-Flow equation	$P_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_i V_n \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad Q_i = -\sum_{n=1}^N Y_{in} V_i V_n \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$ $\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc} \quad \Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,calc}$
Gauss-Seidle Method	<p>หาค่า V ที่บัสที่ทราบค่าของ P และ Q</p> $V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_{i,sch} - jQ_{i,sch}}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^N Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right]$ <p>หาค่า Q จากบัส i</p> $Q_i^{(k)} = -\text{Im} \left\{ V_i^{(k-1)*} \left[\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(k)} + \sum_{j=i}^N Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \right\}$ <p>ใช้แฟคเตอร์อัตราเร่ง α ที่บัส i ในรอบการคำนวณที่ k</p> $V_{i,acc}^{(k)} = (1 - \alpha)V_{i,acc}^{(k-1)} + \alpha V_i^{(k)} = V_{i,acc}^{(k-1)} + \alpha(V_i^{(k)} - V_{i,acc}^{(k-1)})$

<p>Newton-Raphson Method</p>	$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} & V_2 \frac{\partial P_2}{\partial V_2 } & \dots & V_N \frac{\partial P_2}{\partial V_N } \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & V_2 \frac{\partial P_N}{\partial V_2 } & \dots & V_N \frac{\partial P_N}{\partial V_N } \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} & V_2 \frac{\partial Q_2}{\partial V_2 } & \dots & V_N \frac{\partial Q_2}{\partial V_N } \\ \vdots & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} & V_2 \frac{\partial Q_N}{\partial V_2 } & \dots & V_N \frac{\partial Q_N}{\partial V_N } \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_N \\ \frac{\Delta V_2 }{ V_2 } \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_N }{ V_N } \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_N \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix}$
	$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = - V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i) \quad \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{n=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} = -Q_i - V_i ^2 B_{ii}$ $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = - V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i) \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{n=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} = -P_i - V_i ^2 G_{ii}$ $ V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j } = -\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i } = +\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} + 2 V_i ^2 G_{ii}$ $ V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_j } = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i } = -\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} - 2 V_i ^2 B_{ii}$
	<p>การคำนวณหาค่า δ และ V ในรอบที่ $k+1$</p> $\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad V_i ^{(k+1)} = V_i ^{(k)} + \Delta V_i ^{(k)}$ $= V_i ^{(k)} \left(1 + \frac{\Delta V_i ^{(k)}}{ V_i ^{(k)}} \right)$

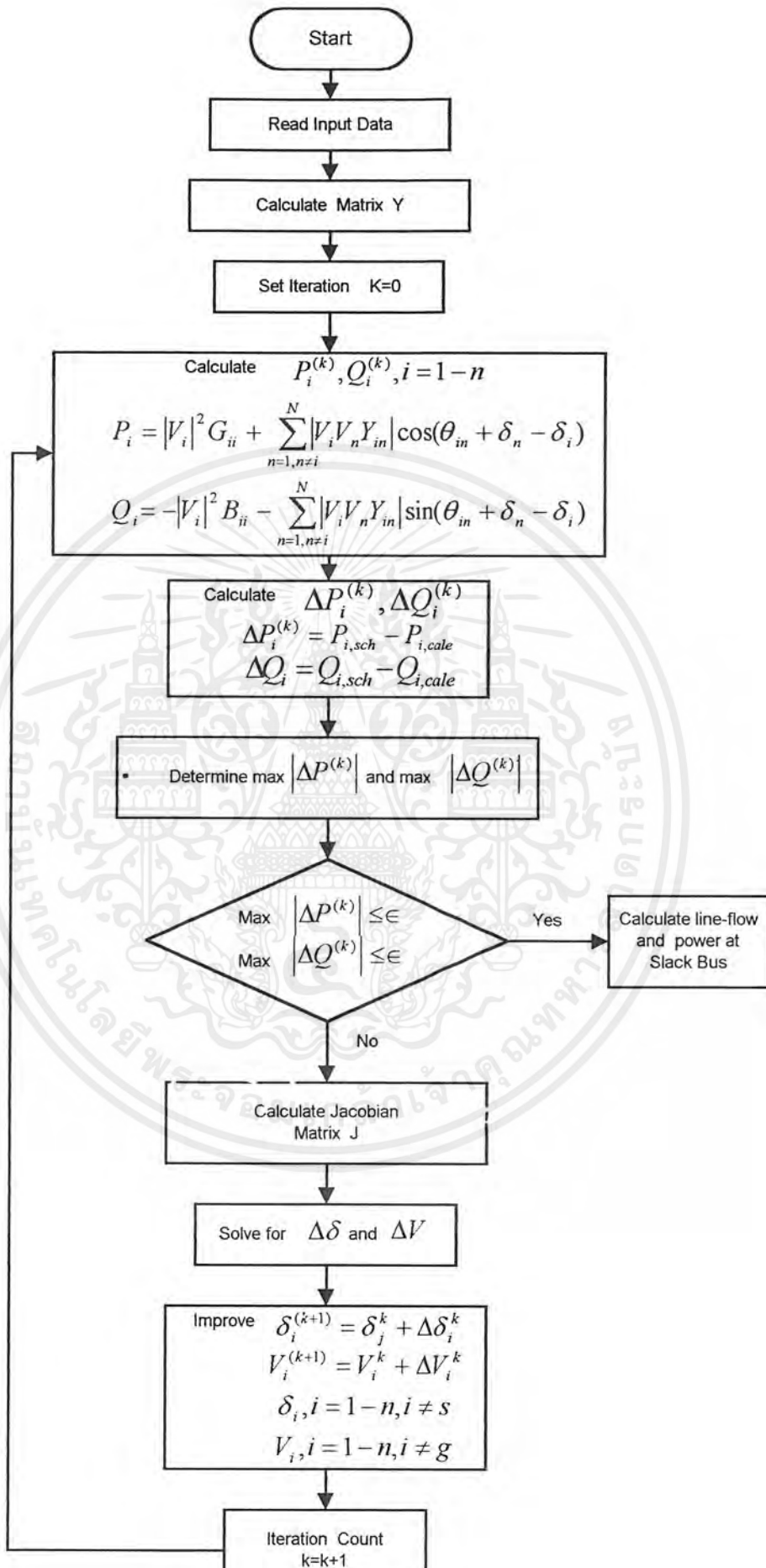
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decoupled power-flow solution technique	$\begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{23} & \cdots & -B_{2N} \\ -B_{32} & -B_{33} & \cdots & -B_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -B_{N2} & -B_{N3} & \cdots & -B_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \vdots \\ \Delta\delta_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 / V_2 \\ \Delta P_3 / V_3 \\ \vdots \\ \Delta P_N / V_N \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{23} & \cdots & -B_{2N} \\ -B_{32} & -B_{33} & \cdots & -B_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -B_{N2} & -B_{N3} & \cdots & -B_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_2 / V_2 \\ \Delta Q_3 / V_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_N / V_N \end{bmatrix}$
---	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

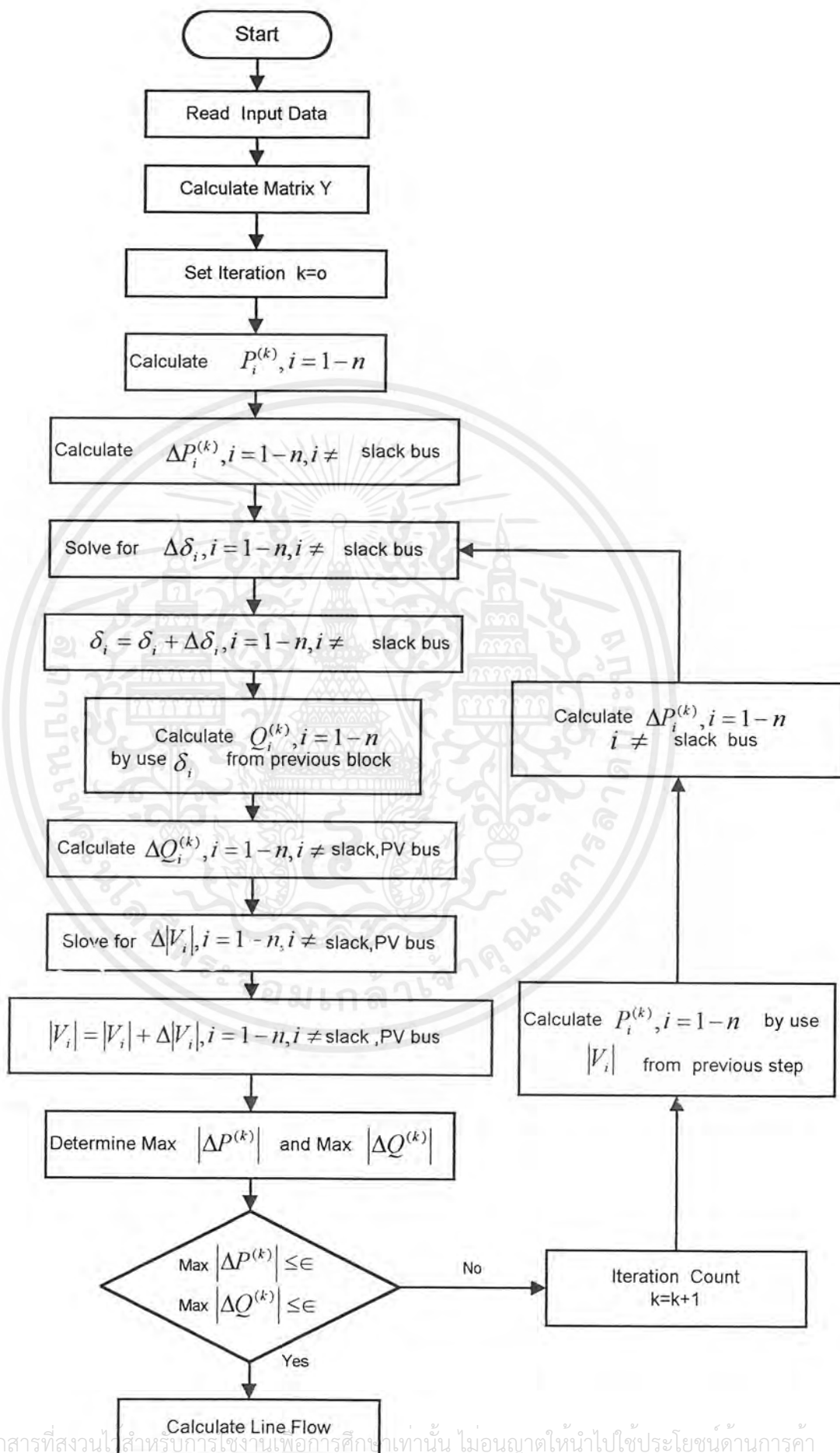


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในห้องเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปดัดแปลงหรือต่ออ้างถึงถึงผู้ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Newton-Raphson Power Flow Solution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decoupled Load Flow Solution

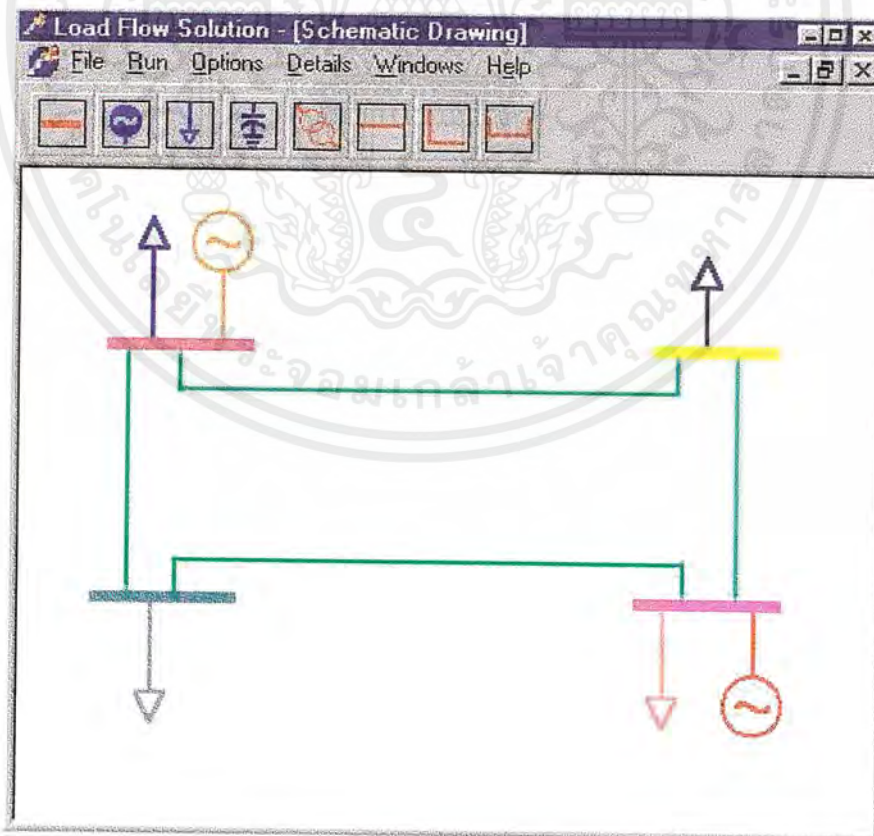
4.2 วิธีการใช้โปรแกรม

หลังจากการติดตั้งโปรแกรม และเรียกใช้โปรแกรมแล้วผู้ใช้โปรแกรมจะมีวิธีการป้อนข้อมูลที่จะใช้คำนวณให้โปรแกรมโดยจะสามารถป้อนได้ 2 แบบ คือ

1. จากเพิ่มข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไว้ ซึ่งเพิ่มข้อมูลที่บันทึกไว้จะเก็บคุณสมบัติ และข้อมูลของระบบไว้ วิธีนี้จะทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการป้อนข้อมูลใหม่ทุกๆครั้งที่ต้องการคำนวณใหม่ และเหมาะสมกับการแก้ไข ลด หรือ ขยาย ระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ทำการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังใหม่ เป็นการวาดรูปแล้วป้อนข้อมูลให้โปรแกรมทำการคำนวณ วิธีนี้ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังระบบใหม่ หรือ หรือข้อมูลที่จะป้อนให้กับโปรแกรมที่ไม่มีการบันทึกข้อมูลเอาไว้

4.2.1 การใช้โปรแกรมโดยการสร้างและป้อนข้อมูลจากระบบใหม่

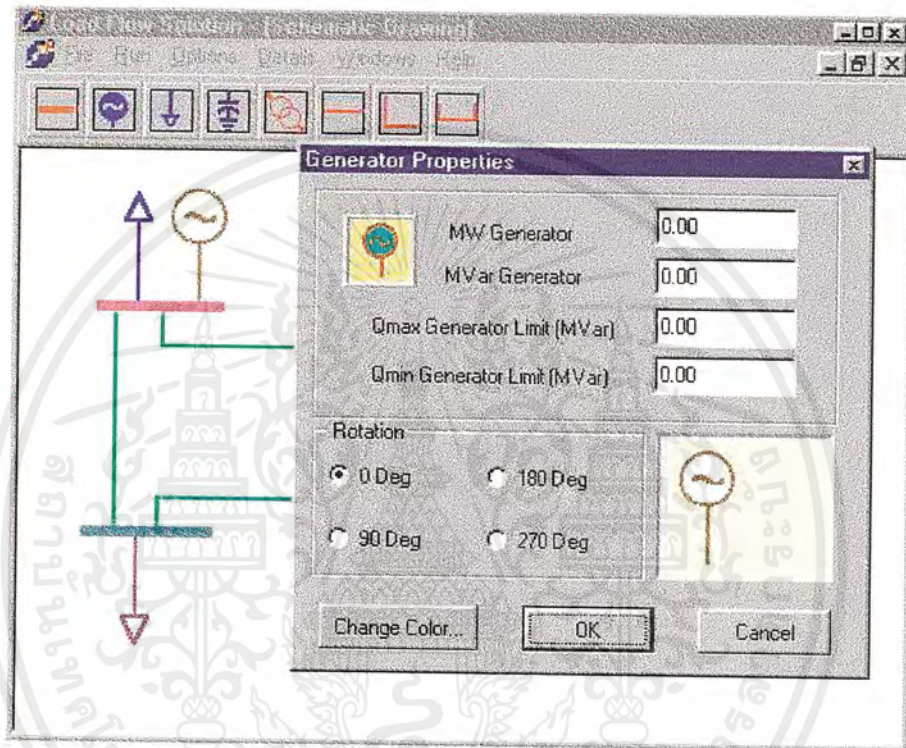
1. ทำการสร้างระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเลือกสัญลักษณ์จากแถบอุปกรณ์ (Tool Bar) มาทำการวาดรูปแสดง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการวาดระบบไฟฟ้ากำลัง

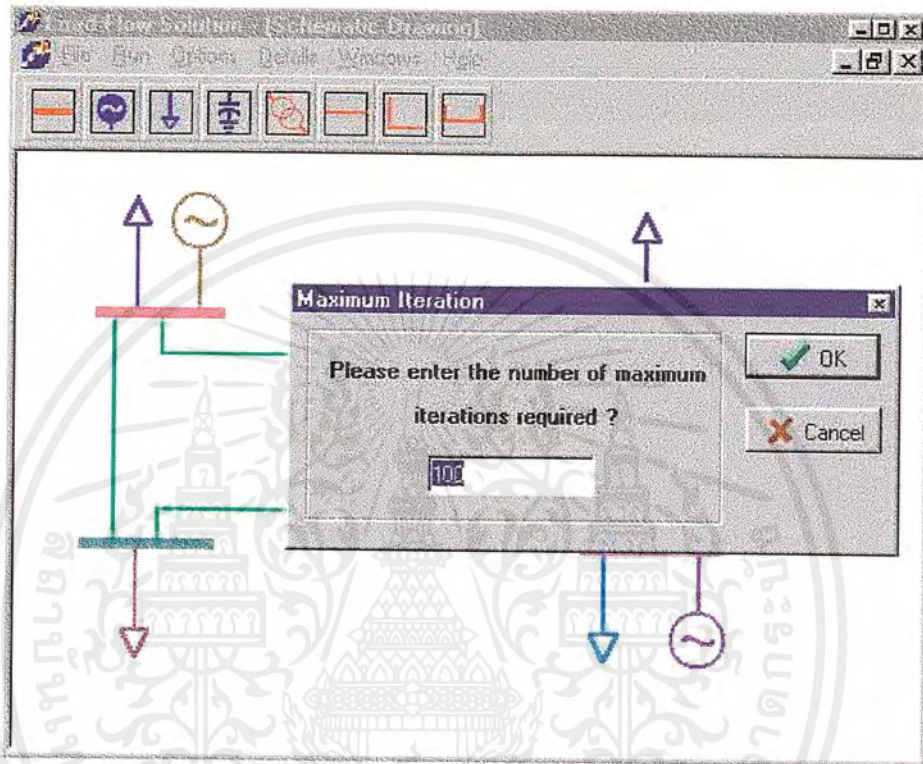
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการป้อนข้อมูลของ Bus , Generator , Transformer , Capacitor และ Line ทุกค่าโดยการใช้เมาส์ ดับเบิ้ลคลิก ที่ตัวสัญลักษณ์ จะมีส่วนรับข้อมูลให้ป้อนค่าลงไป แสดงดังรูปที่ 4.2 เป็นตัวอย่างเมื่อดับเบิ้ลคลิกที่ตัวของ Generator



รูปที่ 4.2 แสดงการป้อนข้อมูลของ Generator

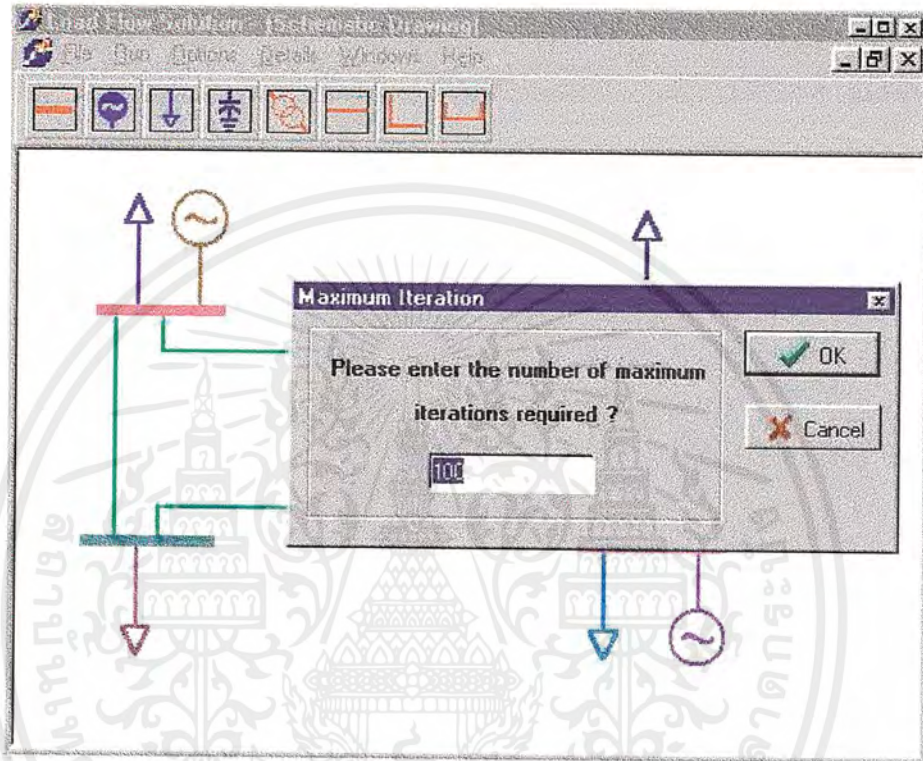
3. กำหนดค่าของ Tolerance โดยคลิกที่คำสั่ง Options / Tolerance ก็จะมีส่วนป้อนค่าขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการป้อนค่า Tolerance (ϵ)

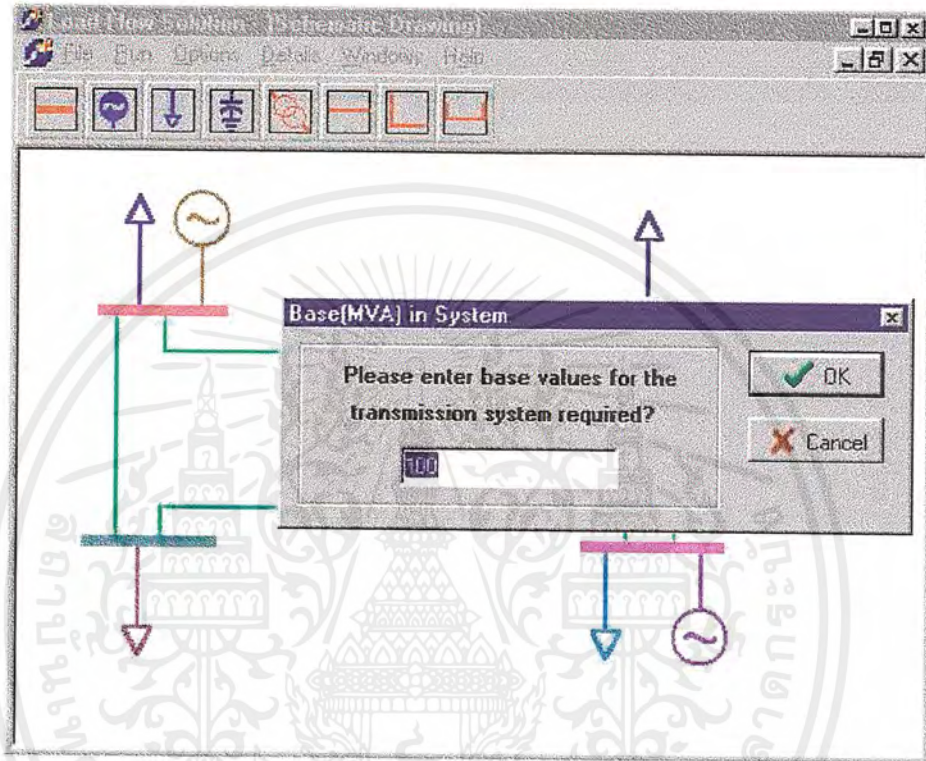
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการคำนวณ โดยคลิกที่คำสั่ง Options / Iteration ก็จะมี ส่วนป้อนค่าขึ้นมา แสดงดังรูป 4.4



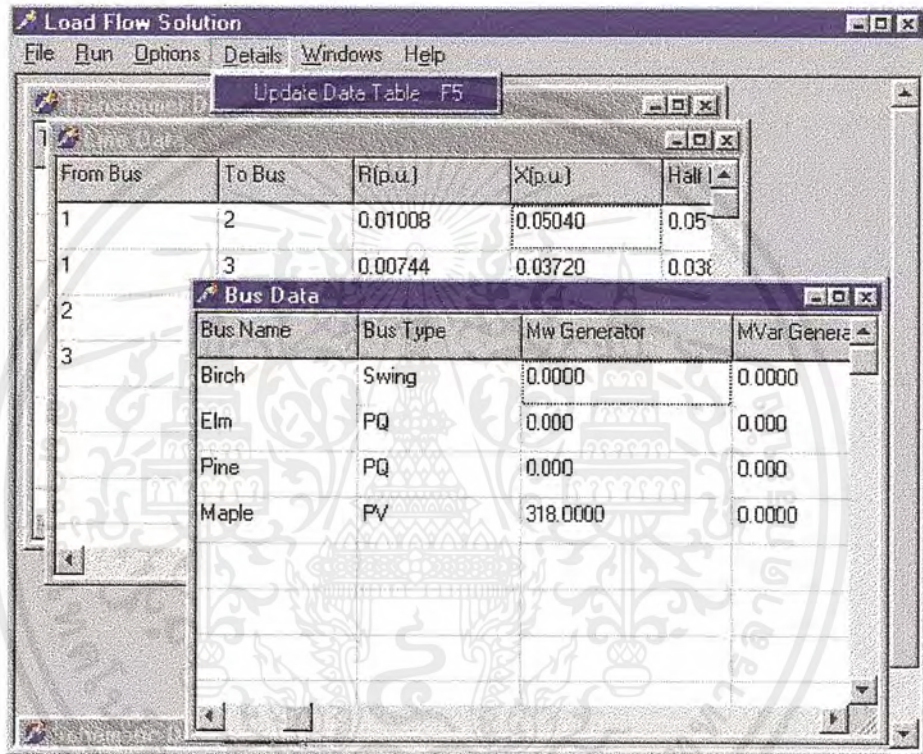
รูปที่ 4.4 แสดงการป้อนค่าจำนวนรอบสูงสุดในการคำนวณ

5. กำหนดค่า Base System ให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยคลิกที่คำสั่ง Options / Base (MVA) จะมีส่วนป้อนค่าแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการป้อนค่า Base (MVA) ของระบบ

6. ทำการโหลดข้อมูลของระบบใหม่ที่สร้างขึ้นมาลงในตาราง Bus Data ,Line Data และ Transformer Data โดยคลิกที่คำสั่ง Details/Update Data Table ซึ่งตารางดังกล่าวจะซ่อนอยู่ด้านหลังของรูประบบ ควรคลิกที่ปุ่ม Minimize ก่อนจะปรากฏผล แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงผลจากการ โหลดข้อมูลลงในตาราง

7. ทำการบันทึกข้อมูลของระบบใหม่ที่สร้างขึ้นมา หรือ จากการแก้ไขเพิ่มข้อมูลเดิมที่มีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการรันโปรแกรมให้คำนวณ ซึ่งจะมีวิธีในการคำนวณอยู่ 3 วิธีการให้เลือกใช้ คือ วิธีของเกาส์-ไซเดล , วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และ วิธีของดีคัมป์เบล เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณตามวิธีการที่เลือกใช้เสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณที่ได้ ดังรูปที่ 4.7

Show Output Solution

POWER FLOW SOLUTION

Newton-Raphson Method Swing Bus /s/ 1

Iteration : Calculation Times : mSec Bus Power System

Bus No	Bus Name	Bus Type	Volt(pu)	Angle(deg)	MW Generation	Mvar Generation	MW Load	Mvar Load
1	Birch	Swing	1.000	0.000	186.79	114.49	50	30.99
2	Elm	PQ	0.982	-0.976	0	0	170	105.35
3	Pine	PQ	0.969	-1.872	0	0	200	123.94
4	Maple	PV	1.020	1.523	318	181.42	80	49.58

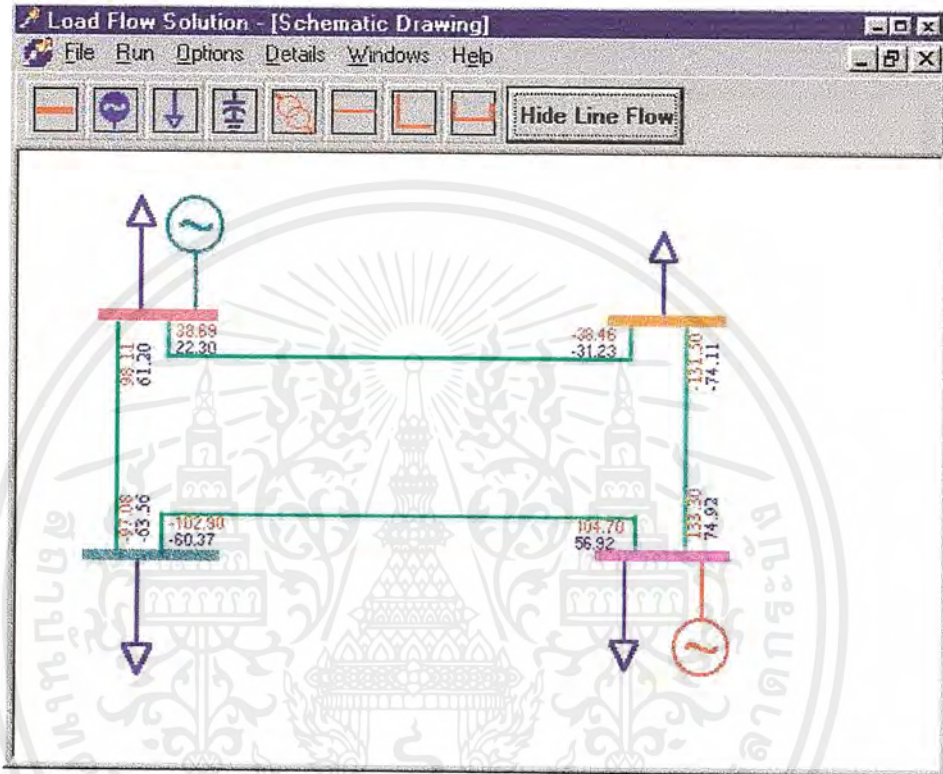
รูปที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณ ของระบบ ไฟฟ้ากำลัง

9. แสดงข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยคลิกที่ปุ่ม Show Line Flow จากตารางแสดงผลการคำนวณ Power Flow Solution ในข้อที่ 8. แล้วจะปรากฏตารางแสดงผลการคำนวณ Output Line Flow แสดงดังรูปที่ 4.8

From Bus	To Bus	Forward Flow(MW)	Forward Flow(MVar)	Reverse Flow(MW)	Reverse Flow(MVar)
1	2	38.69	22.30	-38.46	-31.23
1	3	98.11	61.20	-97.08	-63.56
2	4	-131.50	-74.11	133.30	74.92
3	4	-102.90	-60.37	104.70	56.92

รูปที่ 4.8 แสดงตารางผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า
ที่ส่งจ่ายตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

10. แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในรูปแบบกราฟฟิก โดยคลิกคีย์ปุ่ม Graphic Line Flow จากตารางแสดงผลการคำนวณ Power Flow Solution ในข้อที่ 8 จะได้ผล ดังรูป 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟฟิกของระบบไฟฟ้ากำลัง

11. ทำการพิมพ์ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่ป้อนให้โปรแกรมจาก File / Print Input Data / From Table หรือ File / Print Input Data / From Drawing
12. ทำการพิมพ์ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมจาก File / Print Output Data / Power Flow Solution หรือ คลิกคีย์ปุ่ม Print ที่ตาราง Power Flow Solution และ File / Print Output Data / Output Line Flow หรือ คลิกคีย์ปุ่ม Print ที่ตาราง Output Line Flow
13. เมื่อต้องการจะเปลี่ยนแปลงข้อมูลของระบบสามารถทำได้โดยคลิกที่ปุ่ม Hide Line Flow ในส่วนของผลการแสดงผลทางกราฟฟิก (สังเกตได้จากรูปที่ 4.9) จากนั้นค่า เมกกะวัตต์ และ เมกกะแอมป์ ที่กราฟฟิกของระบบจะหายไป แล้วจึงทำการป้อนข้อมูลที่ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงลงไปตามขั้นตอนข้อที่ 2. แล้วจึงทำการรันโปรแกรมในการคำนวณได้ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น

4.2.2 การใช้โปรแกรมจากข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไว้

1. ทำการคลิกที่คำสั่ง File / Open แล้วเลือกข้อมูลจากไฟล์ที่ทำการบันทึกไว้แล้ว
2. ทำการรันโปรแกรมในการคำนวณ หรือจะเปลี่ยนแปลงข้อมูลของระบบก่อนการรันโปรแกรมได้ตั้งขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น



บทที่ 5

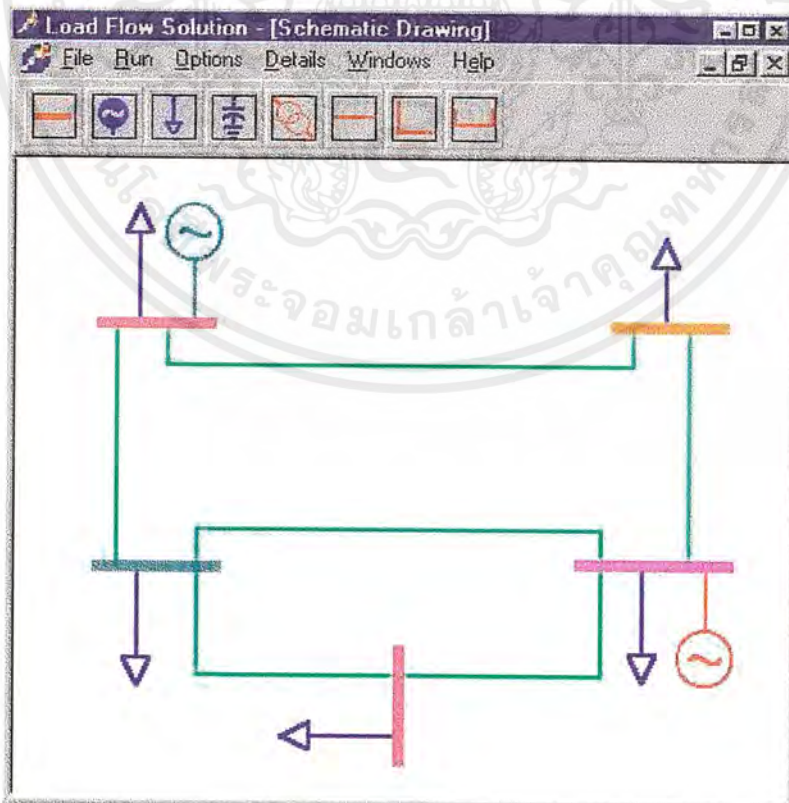
ผลการทดสอบโปรแกรมโหลดโฟล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้การคำนวณทั้ง 3 วิธี คือ วิธีเกาส์-ไซเคิล, วิธีของนิวตัน-ราฟสัน และวิธีดีคัปเปิล สำหรับผลการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ ในปฏิญานีพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอผลการคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส, 14 บัส และ 30 บัส มาแสดง

5.1 รูปแบบการนำเสนอผลการทดสอบ

รูปแบบของการนำเสนอผลของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของโปรแกรมโหลดโฟล ในปฏิญานีพนธ์ฉบับนี้ จะอธิบายรูปแบบของการนำเสนอผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของโปรแกรมโหลดโฟล ในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. การแสดงรูปของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำมาคำนวณในโปรแกรมโหลดโฟล ซึ่งวาดขึ้นโดยโปรแกรมในส่วนของการวาดรูปได้



รูปที่ 5.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตารางแสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะมีส่วนที่บอกให้ทราบ วันและเวลาที่ทำการคำนวณ ,วิธีที่ใช้ในการคำนวณ ,จำนวนรอบที่ใช้คำนวณ ,เวลาที่ใช้คำนวณ ,ขนาดของระบบไฟฟ้ากำลังที่คำนวณ และผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

The screenshot shows a software window titled "POWER FLOW SOLUTION" using the Newton-Raphson Method. It displays the following data:

Bus No	Bus Name	Bus Type	Volt(pu)	Angle(deg)	MW Generation	Mvar Generation	MW Load	Mvar Load
1	Birch	Swing	1.000	0.000	186.79	114.49	50	30.99
2	Elm	PQ	0.982	-0.976	0	0	170	105.35
3	Pine	PQ	0.969	-1.872	0	0	200	123.94
4	Maple	PV	1.020	1.523	318	181.42	80	49.58

Additional parameters shown in the window:

- Iteration: 3
- Calculation Times: 2 mSec
- Swing Bus Is: 1
- Bus Power System: 4

รูปที่ 5.2 แสดงตารางผลการคำนวณของระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตารางแสดงผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง และทิศทางการส่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

Output Line Flow

Output Line Flow

Newton-Raphson Method

From Bus	To Bus	Forward Flow(MW)	Forward Flow(MVar)	Reverse Flow(MW)	Reverse Flow(MVar)
1	2	38.69	22.30	-38.46	-31.23
1	3	98.11	61.20	-97.08	-63.56
2	4	-131.50	-74.11	133.30	74.92
3	4	-102.90	-60.37	104.70	56.92

Print

รูปที่ 5.3 แสดงตารางผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การแสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในลักษณะของตารางที่ได้ทำการพิมพ์
ผลการคำนวณออกมา

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง

17:36:42 24/3/00
Newton-Raphson Method

POWER FLOW SOLUTION
14 BUS POWER SYSTEM
3 ITERATIONS SWING BUS IS 1

Bus Number	Bus Name	Bus Type	Voltage (p.u)		Generator		Load	
			Mag.	Angle	MW	MVar	MW	MVar
1	Bus1	Swing	1.060	0.000	232.30	-16.90	0.00	0.00
2	Bus2	PV	1.045	-4.979	40.00	42.32	21.70	12.70
3	Bus3	PV	1.010	-12.714	0.00	23.36	94.20	19.00
4	Bus4	PQ	1.019	-10.322	0.00	0.00	47.80	-3.90
5	Bus5	PQ	1.020	-8.780	0.00	0.00	7.60	1.60
6	Bus6	PV	1.070	-14.218	0.00	12.16	11.20	7.50
7	Bus7	PQ	1.062	-13.367	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Bus8	PV	1.090	-13.367	0.00	17.32	0.00	0.00
9	Bus9	PQ	1.056	-14.946	0.00	0.00	29.50	16.60
10	Bus10	PQ	1.051	-15.103	0.00	0.00	9.00	5.80
11	Bus11	PQ	1.057	-14.792	0.00	0.00	3.50	1.80
12	Bus12	PQ	1.055	-15.073	0.00	0.00	6.10	1.60
13	Bus13	PQ	1.050	-15.155	0.00	0.00	13.50	5.80
14	Bus14	PQ	1.036	-16.038	0.00	0.00	14.90	5.60

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

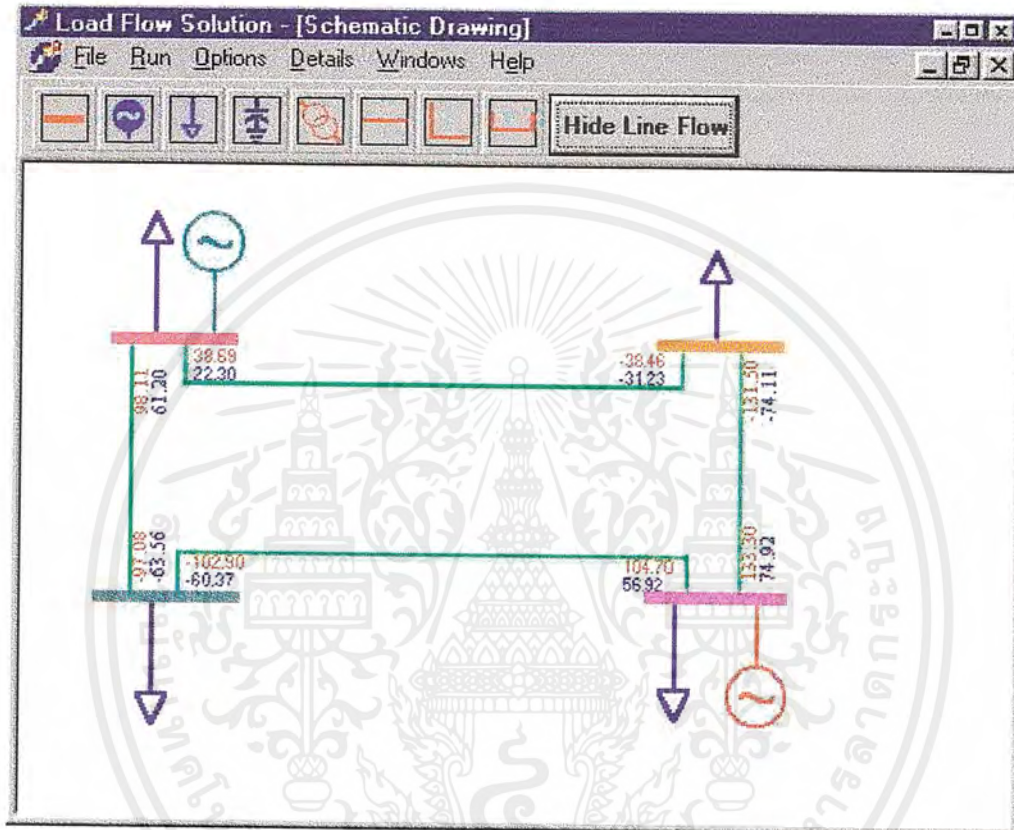
17:37:25 24/3/00

LINE - FLOW

Line From Bus	Line To Bus	Forward Flow		Reverse Flow		Loss	
		MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar
1	2	156.80	-20.38	-152.50	27.63	4.29	7.25
1	5	75.53	3.48	-72.77	-2.60	2.76	6.08
2	3	73.17	3.57	-70.85	1.58	2.32	5.15
2	4	56.13	-2.32	-54.45	3.42	1.68	1.10
2	5	41.50	0.73	-40.60	-1.61	0.90	-0.87
3	4	-23.34	2.78	23.71	-5.39	0.37	-2.61
4	5	-61.23	15.67	61.75	-15.37	0.52	0.30
4	7	28.10	-9.43	-28.10	11.12	0.00	1.69
4	9	16.10	-0.22	-16.10	1.63	0.00	1.30
5	6	44.05	12.85	-44.05	-8.42	0.00	4.43
6	11	7.34	3.45	-7.29	-3.33	0.05	0.11
6	12	7.78	2.48	-7.71	-2.34	0.07	0.15
6	13	17.74	7.15	-17.53	-6.74	0.21	0.42
7	8	0.00	-16.87	0.00	17.32	0.00	0.44
7	9	28.12	5.80	-28.12	-5.00	0.00	0.80
9	10	5.23	4.32	-5.21	-4.28	0.01	0.03
9	14	9.44	3.67	-9.32	-3.43	0.12	0.25
10	11	-3.79	-1.51	3.80	1.54	0.01	0.03
12	13	1.61	0.74	-1.60	-0.73	0.01	0.01
13	14	5.64	1.68	-5.59	-1.57	0.05	0.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ส่วนของกราฟฟิคที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาคำนวณ



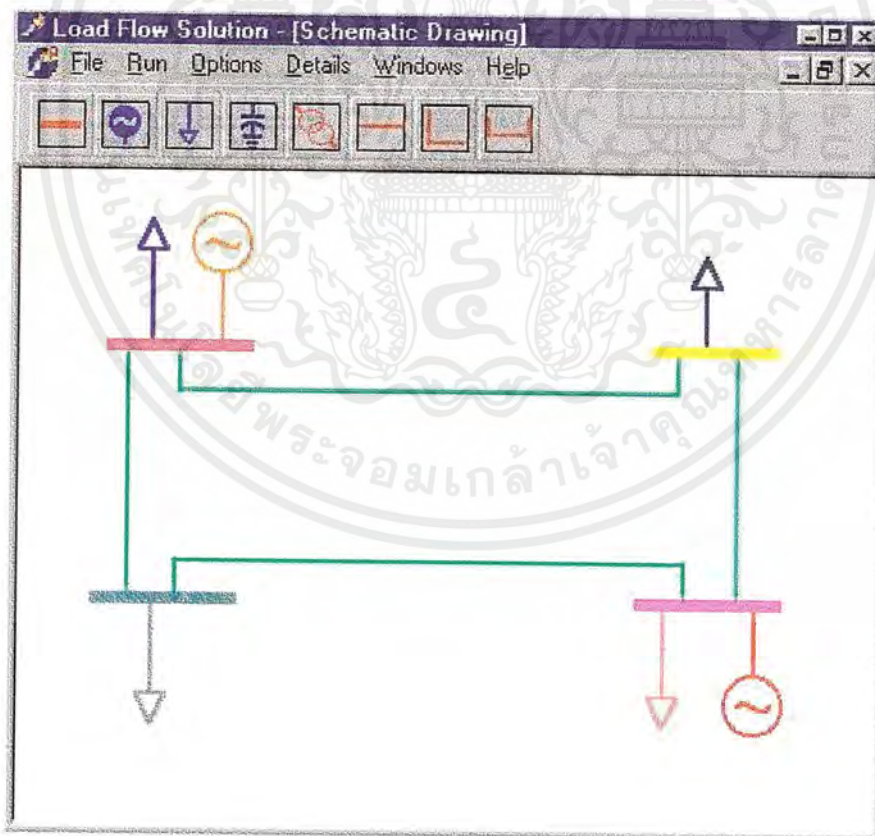
รูปที่ 5.4 แสดงกราฟฟิคของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดสอบโปรแกรม

ในปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้ ได้นำผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส ,14 บัส และ 30 บัส มาแสดง โดยจะนำส่วนของการแสดง รูประบบไฟฟ้ากำลัง ,ตารางแสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้พิมพ์ออกมา และรูปแสดงกราฟฟิกของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในส่วนของตารางแสดงผลการคำนวณของระบบไฟฟ้ากำลัง และตารางแสดงผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายตามสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง จะไม่นำเสนอในปฏิญานินพนธ์ เนื่องจากขอบเขตของการแสดงผลทางจอภาพไม่สามารถแสดงผลการคำนวณทั้งหมดได้ในที่เดียวในกรณีที่มีจำนวนบัสมาก โดยในส่วนของข้อมูลอินพุตได้ทำการแสดงไว้ในภาคผนวกของปฏิญานินพนธ์

ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส



รูปที่ 5.5 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส
ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

POWER FLOW SOLUTION
23:16:36 24/3/00 4 BUS POWER SYSTEM
Newton-Raphson Method 3 ITERATIONS SWING BUS IS 1

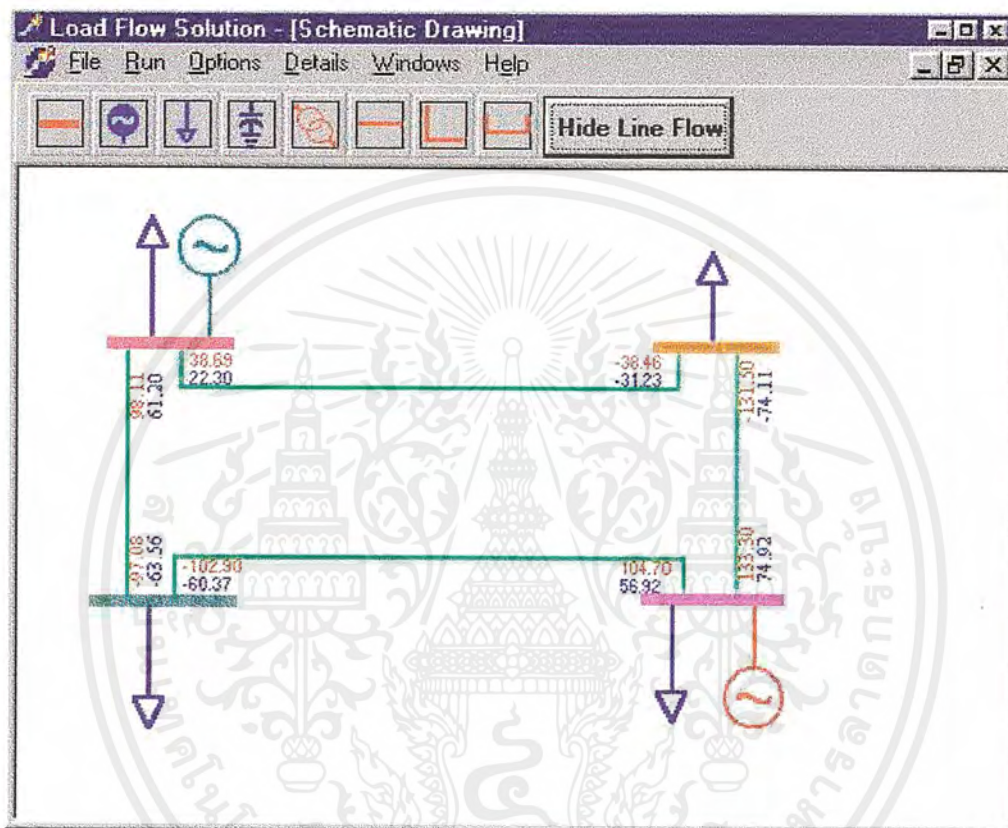
Bus Number	Bus Name	Bus Type	Voltage (p.u)		Generator		Load	
			Mag.	Angle	MW	MVar	MW	MVar
1	Birch	Swing	1.000	0.000	186.79	114.49	50.00	30.99
2	Elm	PQ	0.982	-0.976	0.00	0.00	170.00	105.35
3	Pine	PQ	0.969	-1.872	0.00	0.00	200.00	123.94
4	Maple	PV	1.020	1.523	318.00	181.42	80.00	49.58

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่ง
ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

LINE - FLOW
13:59:26 24/3/00

Line From Bus	Line To Bus	Forward Flow		Reverse Flow		Loss	
		MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar
1	2	38.69	22.30	-38.66	-31.23	0.23	-8.94
1	3	98.11	61.20	-97.06	-63.56	1.03	-2.36
2	4	-131.50	-74.11	133.30	74.92	1.72	0.81
3	4	-102.90	-60.37	104.70	56.92	1.84	-3.44

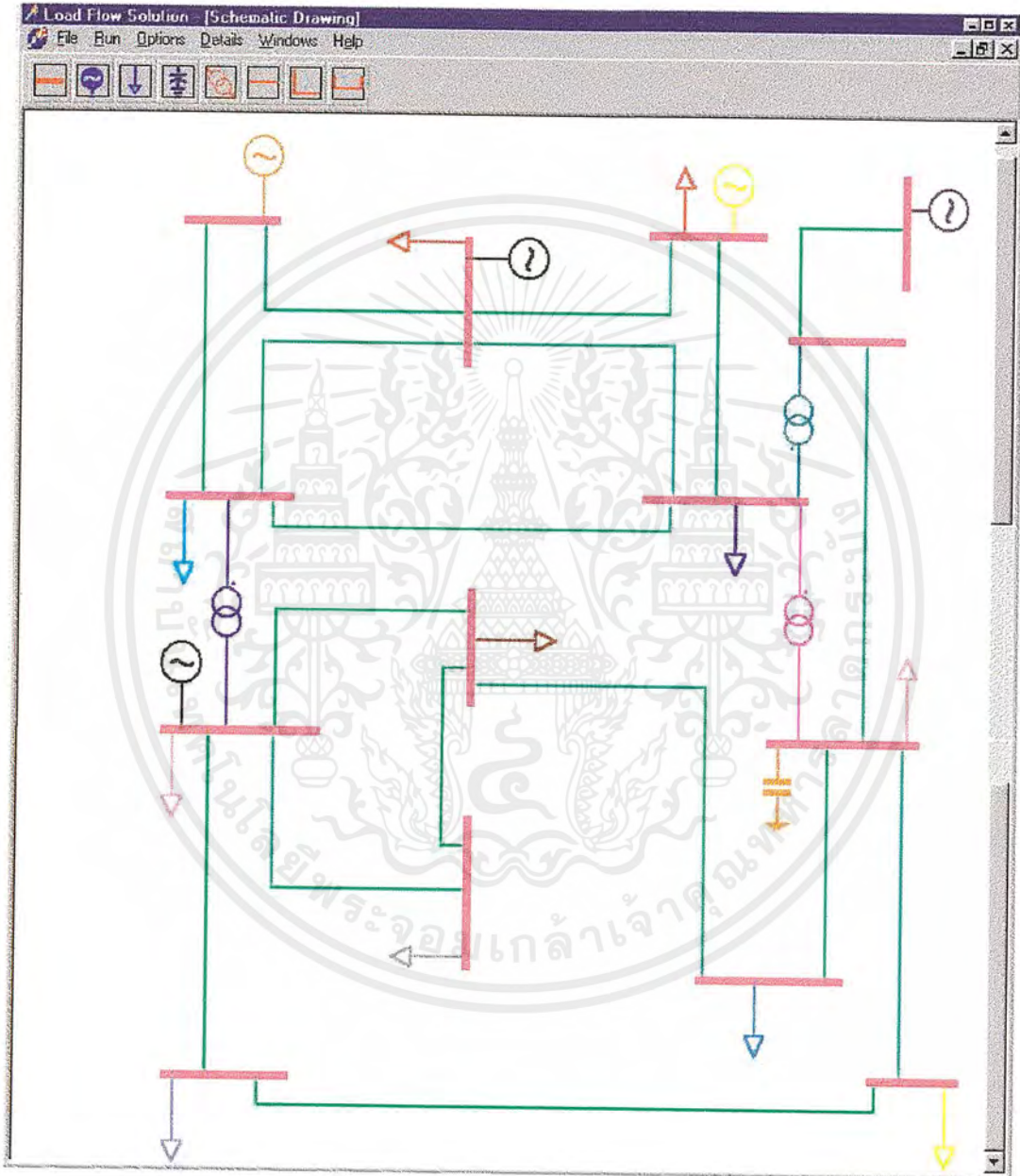
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงกราฟฟิสิกของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส



รูปที่ 5.7 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส
ด้วยวิธีคัลป์เปิล

POWER FLOW SOLUTION
14 BUS POWER SYSTEM
23:03:50 24/3/00
Decoupled Method 12 ITERATIONS SWING BUS IS 1

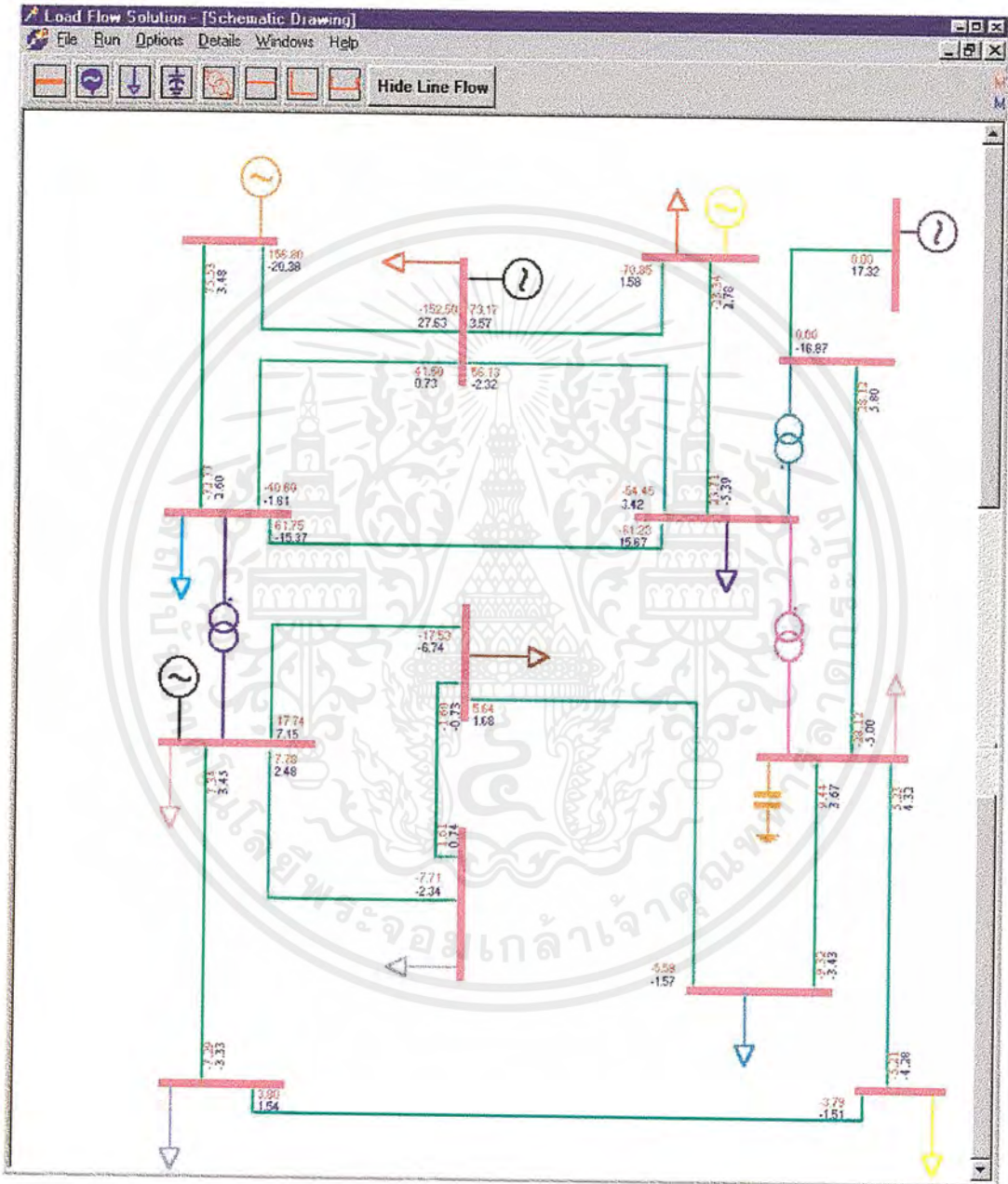
Bus Number	Bus Name	Bus Type	Voltage (p.u)		Generator		Load	
			Mag.	Angle	MW	MVar	MW	MVar
1	Bus1	Swing	1.060	0.000	232.39	-16.89	0.00	0.00
2	Bus2	PV	1.045	-4.981	40.00	42.39	21.70	12.70
3	Bus3	PV	1.010	-12.718	0.00	23.39	94.20	19.00
4	Bus4	PQ	1.019	-10.324	0.00	0.00	47.80	-3.90
5	Bus5	PQ	1.020	-8.783	0.00	0.00	7.60	1.60
6	Bus6	PV	1.070	-14.223	0.00	12.27	11.20	7.50
7	Bus7	PQ	1.062	-13.368	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Bus8	PV	1.090	-13.368	0.00	17.35	0.00	0.00
9	Bus9	PQ	1.056	-14.946	0.00	0.00	29.50	16.60
10	Bus10	PQ	1.051	-15.104	0.00	0.00	9.00	5.80
11	Bus11	PQ	1.057	-14.796	0.00	0.00	3.50	1.80
12	Bus12	PQ	1.055	-15.093	0.00	0.00	6.10	1.60
13	Bus13	PQ	1.051	-15.153	0.00	0.00	13.50	5.80
14	Bus14	PQ	1.036	-16.036	0.00	0.00	14.90	5.00

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่ง
ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส ด้วยวิธีคัลป์เปิล

LINE - FLOW
13:55:01 24/3/00

Line From Bus	Line To Bus	Forward Flow		Reverse Flow		Loss	
		MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar
1	2	156.80	-20.39	-152.50	27.66	4.32	-7.38
1	3	75.55	3.50	-72.79	2.57	2.76	6.06
1	4	73.19	3.57	-70.87	1.59	2.32	5.15
1	5	56.14	-2.29	-54.46	3.40	1.69	7.11
1	6	41.53	0.76	-40.61	-1.63	0.90	-0.87
1	7	-33.33	2.81	23.71	-5.41	0.37	-2.61
1	8	-61.21	15.67	61.73	-15.38	0.52	0.30
1	9	28.09	-9.42	-28.09	11.17	0.00	1.69
1	10	16.09	-0.32	-16.09	1.63	0.00	1.30
1	11	44.07	12.83	-44.07	-8.40	0.00	4.43
1	12	7.34	3.47	-7.28	-3.76	0.05	0.11
1	13	7.96	2.62	-7.88	-2.41	0.09	0.16
1	14	17.60	7.07	-17.39	-6.66	0.21	0.41
2	3	0.00	-16.90	0.00	17.39	0.00	0.45
2	8	28.09	5.79	-28.09	-4.98	0.00	0.80
2	10	5.24	4.31	-5.23	-4.27	0.01	0.03
2	14	9.41	3.65	-9.30	-3.40	0.12	0.25
10	11	-3.77	-1.52	3.78	1.35	0.01	0.03
11	13	1.33	0.68	-1.32	-0.67	0.00	0.00
13	14	5.66	1.71	-5.60	-1.60	0.05	0.11

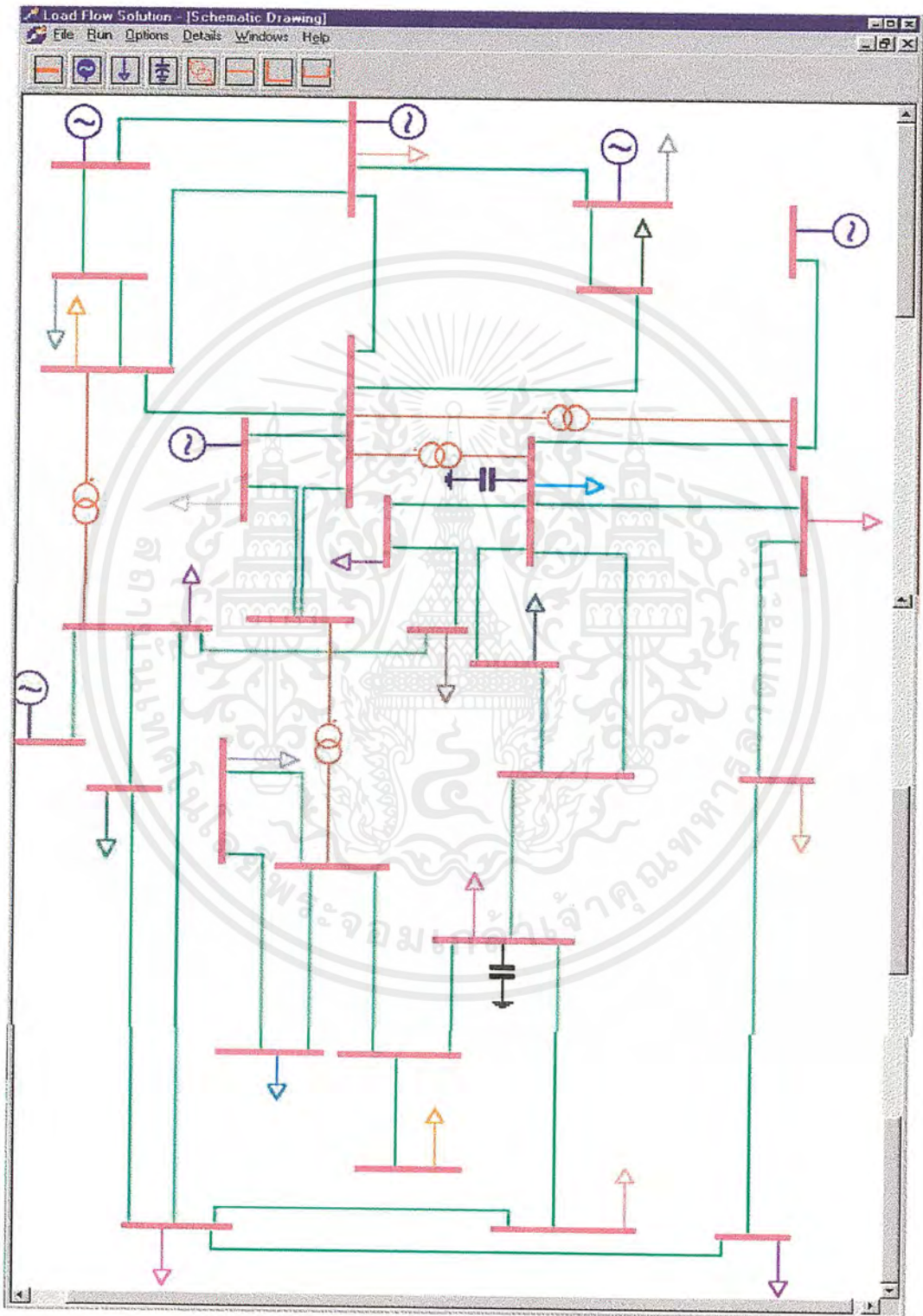
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงกราฟฟิคของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส



รูปที่ 5.9 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส
ด้วยวิธีเกาส์-ไซเคิล

POWER FLOW SOLUTION
30 BUS POWER SYSTEM
17:27:57 24/3/00
Gauss-Seidle Method 164 ITERATIONS SWING BUS IS 1

Bus Number	Bus Name	Bus Type	Voltage (p.u)		Generator		Load	
			Mag.	Angle	MW	MVar	MW	MVar
1	Glen-Lyn	Swing	1.060	0.000	256.57	-19.97	0.00	0.00
2	Claytor	PV	1.045	-5.476	40.00	50.00	21.70	12.70
3	Kumis	PQ	1.021	-7.901	0.00	0.00	2.40	1.20
4	Hancock	PQ	1.012	-9.539	0.00	0.00	7.60	1.60
5	Fieldale	PV	1.010	-14.291	0.00	35.63	94.20	19.00
6	Roanoke	PQ	1.011	-11.251	0.00	0.00	0.00	0.00
7	Blaine	PQ	1.003	-13.026	0.00	0.00	22.80	10.90
8	Reusens	PV	1.010	-11.991	0.00	36.06	30.00	30.00
9	Roanoke	PQ	1.051	-14.247	0.00	0.00	0.00	0.00
10	Roanoke	PQ	1.045	-15.821	0.00	0.00	5.80	2.00
11	Roanoke	PV	1.082	-14.247	0.00	16.18	0.00	0.00
12	Hancock	PQ	1.057	-15.112	0.00	0.00	11.20	7.50
13	Hancock	PV	1.071	-15.112	0.00	10.55	0.00	0.00
14	14Bus	PQ	1.042	-15.992	0.00	0.00	6.20	1.60
15	15Bus	PQ	1.038	-16.074	0.00	0.00	8.20	2.50
16	16Bus	PQ	1.045	-15.682	0.00	0.00	3.50	1.80
17	17Bus	PQ	1.040	-15.987	0.00	0.00	9.00	5.80
18	18Bus	PQ	1.028	-16.666	0.00	0.00	3.20	0.90
19	19Bus	PQ	1.025	-16.832	0.00	0.00	9.50	3.40
20	20Bus	PQ	1.030	-16.637	0.00	0.00	2.20	0.70
21	21Bus	PQ	1.032	-16.254	0.00	0.00	17.50	11.20
22	22Bus	PQ	1.033	-16.242	0.00	0.00	0.00	0.00
23	23Bus	PQ	1.027	-16.454	0.00	0.00	3.20	1.60
24	24Bus	PQ	1.021	-16.620	0.00	0.00	8.70	6.70
25	25Bus	PQ	1.017	-16.204	0.00	0.00	0.00	0.00
26	26Bus	PQ	1.000	-16.624	0.00	0.00	3.50	2.30
27	Clover1	PQ	1.023	-15.693	0.00	0.00	0.00	0.00
28	Clover2	PQ	1.007	-11.869	0.00	0.00	0.00	0.00
29	29Bus	PQ	1.003	-16.921	0.00	0.00	2.40	0.90
30	30Bus	PQ	0.992	-17.805	0.00	0.00	10.60	1.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่ง
ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส ด้วยวิธีของเกาส์-ไซเดล

LINE - FLOW

16:47:43 24/3/00

Line From Bus	Line To Bus	Forward Flow MW	Forward Flow MVar	Reverse Flow MW	Reverse Flow MVar	Loss MW	Loss MVar
1	2	178.00	-25.78	-172.50	36.41	5.50	10.63
1	3	83.09	5.42	-80.29	1.64	2.80	7.06
2	4	45.74	4.26	-44.63	-4.76	1.11	-0.50
2	5	83.07	2.72	-80.08	5.44	2.99	8.16
2	6	61.95	1.79	-59.91	1.23	3.05	3.32
3	4	77.88	-2.84	-77.11	4.78	0.77	1.34
4	6	70.06	-15.37	-69.46	11.53	0.60	1.15
4	12	44.09	14.36	-44.09	-9.69	0.00	1.67
5	7	-14.13	11.25	14.29	-12.92	0.16	-1.67
6	7	37.45	-2.61	-37.08	2.02	0.37	-0.59
6	8	29.58	-7.36	-29.48	6.82	0.11	-0.54
6	28	18.67	0.09	-18.62	-1.21	0.06	-1.12
6	9	27.79	-8.08	-27.79	9.71	0.00	1.63
6	10	15.88	0.21	-15.88	1.08	0.00	1.29
8	28	-0.55	-0.52	0.55	-3.83	0.00	-4.35
9	10	27.80	5.94	-27.80	-5.13	0.00	0.80
9	11	0.00	-15.64	0.00	16.11	0.00	0.46
10	20	8.96	3.63	-8.88	-3.45	0.08	0.18
10	17	5.39	4.58	-5.38	-4.54	0.01	0.04
10	21	15.70	9.97	-15.59	-9.73	0.11	0.24
10	22	7.58	4.58	-7.53	-4.47	0.05	0.11
12	13	0.00	-10.29	0.00	10.42	0.00	0.13
12	14	8.12	2.54	-8.04	-2.38	0.08	0.17
12	15	17.40	6.71	-17.20	-6.31	0.21	0.41
12	16	7.14	3.18	-7.09	-3.07	0.05	0.11
14	15	1.07	0.67	-1.07	-0.67	0.00	0.00
15	18	6.05	1.66	-6.01	-1.58	0.04	0.08
15	23	4.99	2.95	-4.96	-2.89	0.03	0.06
16	17	3.62	1.28	-3.61	-1.26	0.01	0.03
18	19	2.82	0.69	-2.82	-0.68	0.01	0.01
19	20	-6.64	-2.72	6.65	2.75	0.02	0.03
21	22	-1.80	-1.45	1.80	1.45	0.00	0.00
22	24	5.50	2.98	-5.46	-2.91	0.04	0.07
23	24	1.78	1.29	-1.77	-1.28	0.01	0.01
24	25	-1.16	2.05	1.17	-2.03	0.01	0.02
25	26	3.28	2.38	-3.24	-2.32	0.04	0.06
25	27	-4.68	-0.35	4.70	0.40	0.02	0.04
27	29	6.13	1.67	-6.05	-1.51	0.08	0.16
27	30	7.04	1.66	-6.88	-1.36	0.16	0.30
28	27	18.10	5.03	-18.10	-3.74	0.00	1.29
29	30	3.69	0.60	-3.66	-0.54	0.03	0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส
ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

POWER FLOW SOLUTION
30 BUS POWER SYSTEM
3 ITERATIONS SWING BUS IS 1

17:25:27 24/3/00
Newton-Raphson Method

Bus Number	Bus Name	Bus Type	Voltage (p.u)		Generator		Load	
			Mag.	Angle	MW	MVar	MW	MVar
1	Glen-Lyn	Swing	1.060	0.000	260.95	-20.38	0.00	0.00
2	Claytor	PV	1.045	-5.526	40.00	50.00	21.70	12.70
3	Kumis	PQ	1.021	-7.985	0.00	0.00	2.40	1.20
4	Hancock	PQ	1.012	-9.639	0.00	0.00	7.60	1.60
5	Fieldale	PV	1.010	-14.373	0.00	35.66	94.20	19.00
6	Roanoke	PQ	1.011	-11.362	0.00	0.00	0.00	0.00
7	Blaine	PQ	1.003	-12.126	0.00	0.00	22.80	10.90
8	Reusens	PV	1.010	-12.105	0.00	36.19	30.00	30.00
9	Roanoke	PQ	1.051	-14.415	0.00	0.00	0.00	0.00
10	Roanoke	PQ	1.045	-16.011	0.00	0.00	5.80	2.00
11	Roanoke	PV	1.082	-14.415	0.00	16.07	0.00	0.00
12	Hancock	PQ	1.057	-15.279	0.00	3.00	11.20	7.50
13	Hancock	PV	1.071	-15.279	0.00	10.34	0.00	0.00
14	14Bus	PQ	1.043	-16.169	0.00	0.00	6.20	1.60
15	15Bus	PQ	1.038	-16.258	0.00	0.00	8.20	2.50
16	16Bus	PQ	1.045	-15.862	0.00	0.00	3.50	1.80
17	17Bus	PQ	1.040	-16.174	0.00	0.00	9.00	5.80
18	18Bus	PQ	1.028	-16.866	0.00	0.00	3.20	0.90
19	19Bus	PQ	1.026	-17.036	0.00	0.00	9.50	3.40
20	20Bus	PQ	1.030	-16.837	0.00	0.00	2.20	0.70
21	21Bus	PQ	1.033	-16.455	0.00	0.00	17.50	11.20
22	22Bus	PQ	1.033	-16.441	0.00	0.00	0.00	0.00
23	23Bus	PQ	1.027	-16.642	0.00	0.00	3.20	1.60
24	24Bus	PQ	1.022	-16.810	0.00	0.00	8.70	6.70
25	25Bus	PQ	1.018	-16.375	0.00	0.00	0.00	0.00
26	26Bus	PQ	1.000	-16.795	0.00	0.00	3.50	2.30
27	Clover1	PQ	1.024	-15.846	0.00	0.00	0.00	0.00
28	Clover2	PQ	1.007	-11.986	0.00	0.00	0.00	0.00
29	29Bus	PQ	1.004	-17.076	0.00	0.00	2.40	0.90
30	30Bus	PQ	0.992	-17.958	0.00	0.00	10.60	1.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่ง
ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

LINE - FLOW

16:46:19 24/3/20

Line From Bus	Line To Bus	Forward Flow MW	Forward Flow MVar	Reverse Flow MW	Reverse Flow MVar	Loss MW	Loss MVar
1	2	177.90	-25.76	-172.40	36.37	5.50	10.61
1	3	83.06	5.38	-80.26	1.66	2.80	7.05
2	4	45.72	4.23	-44.61	-4.73	1.11	-0.51
2	5	83.05	2.73	-80.06	5.43	2.99	8.16
2	6	61.93	1.08	-59.89	1.24	2.05	2.32
3	4	77.88	-2.81	-77.11	4.14	0.77	1.34
4	6	70.07	-15.31	-69.47	16.46	0.60	1.15
4	11	41.09	14.34	-44.09	-9.68	0.00	4.67
5	7	-14.13	11.23	14.29	-12.90	0.16	-1.67
6	7	37.46	-2.60	-37.09	2.00	0.37	-0.59
6	8	29.56	-7.27	-29.45	6.73	0.11	-0.54
6	28	18.69	0.09	-18.64	-1.20	0.06	-1.12
6	9	27.80	-8.09	-27.80	9.72	0.00	1.63
6	10	15.89	0.20	-15.89	1.09	0.00	1.29
8	28	-0.54	-0.54	0.54	-3.81	0.00	-4.35
9	10	27.83	5.93	-27.83	-5.13	0.00	0.81
9	11	0.00	-15.62	0.00	16.07	0.00	0.46
10	20	9.07	3.66	-8.98	-3.48	0.08	0.18
10	17	5.41	4.58	-5.40	-4.54	0.01	0.04
10	21	15.80	9.99	-15.69	-9.75	0.11	0.24
10	22	7.63	4.58	-7.57	-4.48	0.05	0.11
12	13	0.00	-10.21	0.00	10.34	0.00	0.13
12	14	7.86	2.42	-7.78	-2.26	0.07	0.15
12	15	17.96	6.85	-17.64	-6.42	0.22	0.43
12	16	7.18	3.19	-7.13	-3.08	0.05	0.11
14	15	1.57	0.66	-1.57	-0.66	0.01	0.01
15	18	5.99	1.64	-5.95	-1.56	0.04	0.08
15	23	5.00	2.95	-4.97	-2.88	0.03	0.06
16	17	3.62	1.28	-3.61	-1.26	0.01	0.03
19	19	2.75	0.66	-2.74	-0.65	0.00	0.01
19	20	-6.76	-2.75	6.78	2.78	0.02	0.02
21	22	-1.83	-1.45	1.83	1.45	0.00	0.00
22	24	5.75	3.07	-5.70	-2.95	0.05	0.07
23	24	1.77	1.28	-1.76	-1.27	0.01	0.01
24	25	-1.24	3.02	1.25	-2.00	0.00	0.02
25	26	3.55	2.37	-3.50	-2.30	0.04	0.07
25	27	-4.80	-0.36	4.82	0.41	0.02	0.05
27	29	6.19	1.67	-6.11	-1.50	0.09	0.16
27	30	7.09	1.66	-6.93	-1.36	0.16	0.31
29	27	18.10	5.02	-18.10	-3.73	0.00	1.26
29	30	3.70	0.61	-3.67	-0.54	0.03	0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส
ด้วยวิธีคัลป์เปิด

POWER FLOW SOLUTION
17:26:44 24/3/00 30 BUS POWER SYSTEM
Decoupled Method 8 ITERATIONS SWING BUS IS 1

Bus Number	Bus Name	Bus Type	Voltage (p.u)		Generator		Load	
			Mag.	Angle	MW	MVar	MW	MVar
1	Glen-Lyn	Swing	1.060	0.000	261.06	-20.36	0.00	0.00
2	Claytor	PV	1.045	-5.528	40.00	50.00	21.70	12.70
3	Kumis	PQ	1.021	-7.988	0.00	0.00	2.40	1.20
4	Hancock	PQ	1.012	-9.642	0.00	0.00	7.60	1.60
5	Fieldale	PV	1.010	-14.377	0.00	35.69	94.20	19.00
6	Roanoke	PQ	1.011	-11.366	0.00	0.00	0.00	0.00
7	Blaine	PQ	1.003	-13.130	0.00	0.00	22.80	10.90
8	Reusens	PV	1.010	-12.110	0.00	36.30	30.00	30.00
9	Roanoke	PQ	1.051	-14.418	0.00	0.00	0.00	0.00
10	Roanoke	PQ	1.045	-16.013	0.00	0.00	5.80	2.00
11	Roanoke	PV	1.082	-14.418	0.00	16.11	0.00	0.00
12	Hancock	PQ	1.057	-15.283	0.00	0.00	11.20	7.50
13	Hancock	PV	1.071	-15.283	0.00	10.42	0.00	0.00
14	14Bus	PQ	1.042	-16.200	0.00	0.00	6.20	1.60
15	15Bus	PQ	1.038	-16.235	0.00	0.00	8.20	2.50
16	16Bus	PQ	1.045	-15.863	0.00	0.00	3.50	1.80
17	17Bus	PQ	1.040	-16.175	0.00	0.00	9.00	5.80
18	18Bus	PQ	1.029	-16.649	0.00	0.00	3.20	0.90
19	19Bus	PQ	1.026	-17.023	0.00	0.00	9.50	3.40
20	20Bus	PQ	1.030	-16.828	0.00	0.00	2.20	0.70
21	21Bus	PQ	1.033	-16.453	0.00	0.00	17.50	11.20
22	22Bus	PQ	1.033	-16.439	0.00	0.00	0.00	0.00
23	23Bus	PQ	1.028	-16.618	0.00	0.00	3.20	1.60
24	24Bus	PQ	1.022	-16.787	0.00	0.00	8.70	6.70
25	25Bus	PQ	1.018	-16.364	0.00	0.00	0.00	0.00
26	26Bus	PQ	1.001	-16.725	0.00	0.00	3.50	2.30
27	Clover1	PQ	1.024	-15.848	0.00	0.00	0.00	0.00
28	Clover2	PQ	1.007	-11.989	0.00	0.00	0.00	0.00
29	29Bus	PQ	1.004	-17.064	0.00	0.00	2.40	0.90
30	30Bus	PQ	0.992	-17.943	0.00	0.00	10.60	1.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

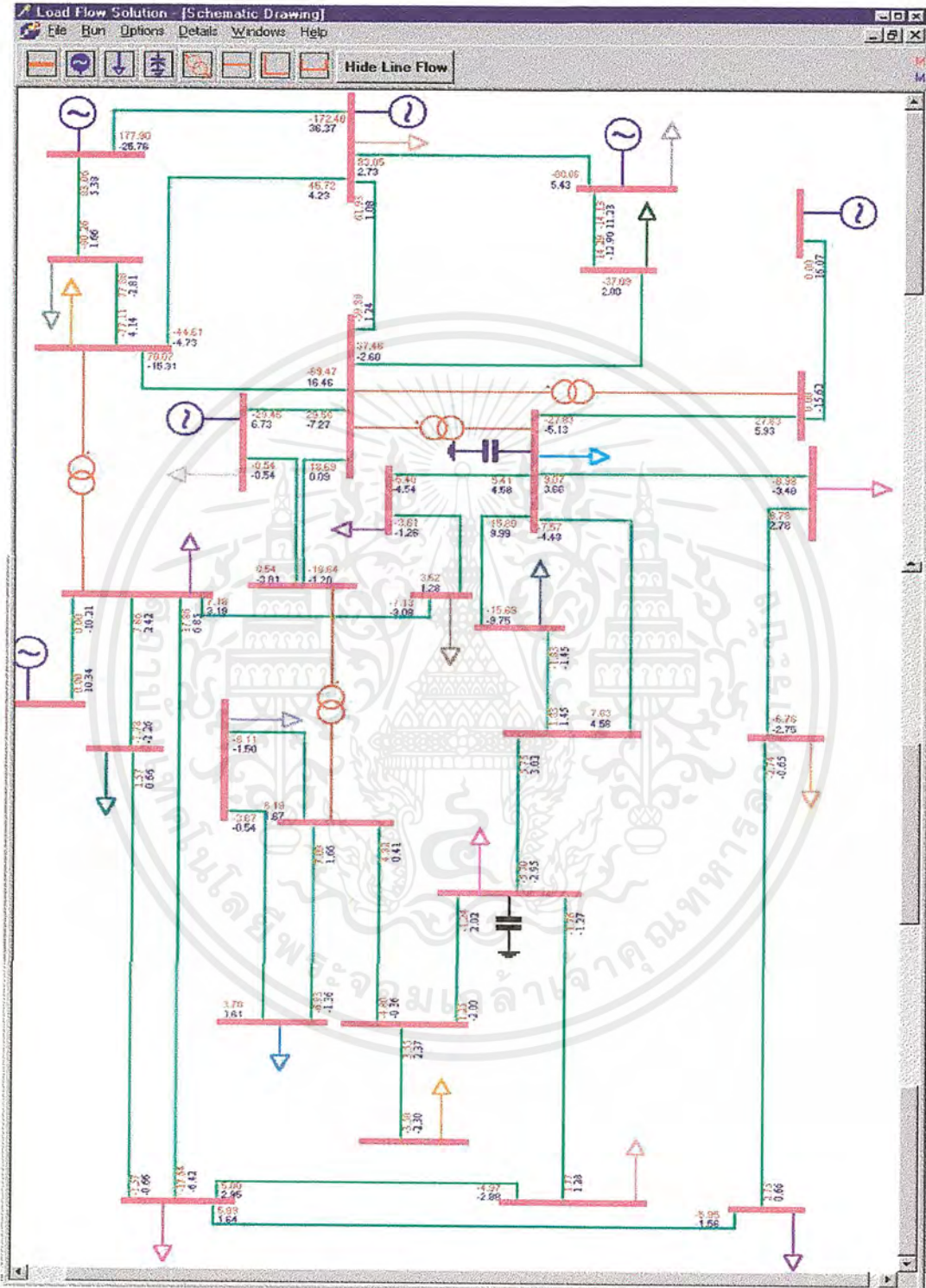
ตารางที่ 5.12 แสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามสายส่ง
ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส ด้วยวิธีคัลปีเปิด

LINE - FLOW

18:50:10 24/3/00

Line From Bus	Line To Bus	Forward Flow MW	Forward Flow MVar	Reverse Flow MW	Reverse Flow MVar	Loss MW	Loss MVar
1	2	176.30	-25.40	-170.90	35.72	5.40	10.32
1	3	82.23	5.43	-79.49	1.39	2.74	6.82
2	4	45.23	4.30	-44.14	-4.88	1.09	-0.58
2	5	82.76	2.75	-79.79	5.32	2.97	8.07
2	6	61.33	1.18	-59.32	1.02	2.01	2.20
3	4	77.21	-2.62	-76.45	3.92	0.76	1.30
4	6	69.60	-15.11	-69.01	16.23	0.59	1.12
4	12	43.56	14.44	-43.56	-9.87	0.00	4.57
5	7	-14.37	11.31	14.53	-12.97	0.16	-1.66
6	7	37.70	-2.65	-37.33	-2.07	0.37	-0.58
6	8	29.50	-7.14	-29.39	6.60	0.11	-0.54
6	28	18.56	0.18	-18.50	-1.30	0.06	-1.12
6	9	27.29	-7.99	-27.29	9.56	0.00	1.57
6	10	15.62	0.27	-15.62	0.98	0.00	1.25
8	28	-0.57	-0.54	0.57	-3.81	0.00	-4.35
9	10	27.42	6.15	-27.42	-5.36	0.00	0.79
9	11	0.00	-15.72	0.00	16.18	0.00	0.47
10	20	8.98	3.69	-8.90	-3.51	0.08	0.18
10	17	5.45	4.52	-5.44	-4.48	0.01	0.04
10	21	15.57	10.11	-15.46	-9.88	0.11	0.24
10	22	7.53	4.64	-7.48	-4.53	0.05	0.11
12	13	0.00	-10.42	0.00	10.55	0.00	0.14
12	14	7.80	2.47	-7.72	-2.32	0.07	0.15
12	15	17.67	6.98	-17.45	-6.56	0.21	0.42
12	16	7.09	3.27	-7.03	-3.16	0.05	0.11
14	15	1.54	0.63	-1.54	-0.69	0.01	0.01
15	18	5.89	1.72	-5.85	-1.64	0.04	0.08
15	23	4.97	2.99	-4.94	-2.92	0.03	0.06
16	17	3.58	1.34	-3.56	-1.31	0.01	0.03
18	19	2.71	0.70	-2.71	-0.69	0.00	0.01
19	20	-6.08	-2.78	6.10	2.81	0.02	0.03
21	22	-1.71	-1.53	1.71	1.53	0.00	0.00
22	21	5.80	2.97	-5.76	-2.90	0.05	0.07
23	21	1.77	1.31	-1.76	-1.29	0.01	0.01
24	25	-1.16	1.97	1.17	-1.25	0.01	0.02
25	26	3.54	2.37	-3.50	-2.30	0.04	0.07
25	23	-4.68	-0.44	4.70	0.49	0.02	0.04
27	29	6.18	1.67	-6.10	-1.51	0.09	0.16
27	30	7.09	1.66	-6.93	-1.36	0.16	0.31
28	27	17.93	5.11	-17.93	-3.84	0.00	1.27
28	30	3.71	0.60	-3.67	-0.54	0.03	0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงกราฟฟิคของผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบโปรแกรม โปรแกรมจะมีความสามารถในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว โดยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่น ๆ ได้ไม่จำกัดเฉพาะแต่ในระบบที่แสดงผลในปริภูมิพหุคูณฉบับนี้ โดยโปรแกรมจะมีข้อจำกัด คือ จำนวนบัสในระบบที่ต้องการศึกษาจะต้องไม่เกิน 60 บัส จำนวนสายส่งไม่เกิน 120 เส้น และจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เกิน 20 ตัว โปรแกรมจะมีการรับค่าพารามิเตอร์ อินพุต 5 ประเภท คือ ข้อมูลของบัส, ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ข้อมูลของสายส่งที่มีวงจรสมมูลแบบพายนน์, ข้อมูลของหม้อแปลงแบบเปลี่ยนแทนไปได้ และข้อมูลของคาปาซิเตอร์

การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง และการป้อนข้อมูลค่าพารามิเตอร์จะเป็นรูปแบบ (Visual Interfacing) คือเป็นรูปแบบที่ผู้ใช้โปรแกรมสามารถติดต่อกับตัวโปรแกรมได้แบบเสมือนจริง เข้าใจได้ง่าย และมีความสวยงามเมื่อทำการรันโปรแกรมและเมื่อทำการพิจารณาจากรูปเอาท์พุทแล้วจะพบว่าผลเอาท์พุทจะบอกค่าแรงดันที่บัส ออกมาในค่าเปอร์เซ็นต์ ส่วนกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โหลด และกำลังไฟฟ้าที่ไหลตามสายส่ง จะบอกออกมาเป็นค่าเมกะวัตต์ และ เมกะวาร์ ตามลำดับ โดยมีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบแสดงให้เห็นเป็นลักษณะรูปลูกศรเคลื่อนไป ความสายส่ง

จากการทดสอบโปรแกรมโพลโคพลจะพบว่า การใช้โปรแกรมคำนวณทั้ง 3 วิธี คือ วิธีของเกาส์-ไซเดิล (Gauss-Seidle Method) วิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raph Method) และวิธีดีคัปเปิล (Decoupled Method) จะมีความแตกต่างกันเมื่อทำการเปรียบเทียบกันในเรื่องต่อไปนี้

1. เวลาที่ใช้ในการคำนวณ เวลาในการคำนวณของวิธีของเกาส์-ไซเดิล (Gaus-Seidle Method) จะใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุดเมื่อจำนวนบัสเพิ่มขึ้น แต่ในจำนวนบัสไม่มากเวลาของวิธีของเกาส์-ไซเดิล (Gaus-Seidle Method) ก็มีโอกาสที่ใช้เวลาได้น้อยที่สุด เนื่องจาก อัลกอริทึม ของการเขียนโปรแกรมของวิธีนี้ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับ วิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raph Method) และวิธีดีคัปเปิล (Decoupled Method) ส่วนวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raph Method) และวิธีดีคัปเปิล (Decoupled Method) ทั้ง 2 วิธีจะใช้เวลาในการคำนวณ ไม่ต่างกันมากนัก

2. จำนวนรอบของการคำนวณ วิธีของเกาส์-ไซเดิล (Gauss-Seidle Method) จะจำนวนรอบในการคำนวณมากที่สุด และวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raph Method) จะใช้จำนวนรอบในการคำนวณน้อยที่สุด

ข้อเสนอแนะ และ แนวทางการพัฒนาโปรแกรม

เนื่องจากโปรแกรมที่ได้จัดทำขึ้นมา โดยใช้โปรแกรม Delphi 4 มีอุปสรรคในส่วนของกราฟฟิกเป็นอย่างมาก ทำให้โปรแกรมต้องมีการจำกัดขอบเขตของการวาดรูประบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นเพื่อให้กราฟฟิกของโปรแกรมมีประสิทธิภาพในการวาดรูประบบไฟฟ้ากำลังที่ดีขึ้น ควรจะใช้โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา Vissaul Basic หรือ Vissaul C++ ซึ่งทั้ง 2 ภาษาสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรม Vissio ได้ ซึ่งมีรูปแบบของการวาดระบบไฟฟ้ากำลังที่มีประสิทธิภาพมากกว่า

ในส่วนของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง ๆ ควรต้องมีข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปแบบของตารางโหลด ณ เวลาต่าง ๆ ทำให้การคำนวณได้ข้อมูลทุก ๆ เวลา และโปรแกรมควรต้องคำนึงถึงเรื่อง Optimal Power Flow ของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อการประหยัดค่าใช้จ่าย โดยในส่วนของโปรแกรมที่จัดทำขึ้นโปรแกรมจะทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานั้น ๆ เท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงเรื่อง Optimal Power Flow ด้วยเหตุนี้ในการพัฒนาโปรแกรมครั้งต่อไปควรจะคำนึงถึงเรื่องดังกล่าวด้วย

ภาคผนวก

วิธีการติดตั้งโปรแกรม

การติดตั้งโปรแกรมเข้ากับระบบปฏิบัติการใน วินโดว์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ใส่แผ่นซีดีรอมลงในไดรฟ์ของซีดีรอม
2. ไปที่สตาร์ทเมนู แล้วเลือกคำสั่งรัน
3. พิมพ์ D:/setup (ในกรณีที่ไดรฟ์ซีดีรอมคือไดรฟ์ D)จากนั้นกดปุ่ม OK
4. ดำเนินตามคำสั่งในการติดตั้งที่ปรากฏบนหน้าจอ จนเสร็จวิธีการติดตั้ง

ข้อมูลในการรันโปรแกรม

แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส

Bus Data											
Bus No	Bus Name	Bus Type	Mw Gen.	MVar Gen.	Mw Load	MVar Load	Volt (p.u)	Angle (deg)	Qmax Gen.	Qmin Gen.	Capacitor
1	Birch	Swing	0	0	50	30.99	1.00	0.0	0	0	0
2	Elm	PQ	0	0	170	105.35	1.00	0.0	0	0	0
3	Pine	PQ	0	0	200	123.94	1.00	0.0	0	0	0
4	Maple	PV	318	0	80	49.58	1.02	0.0	250	-250	0

Line Data					
Line No	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging
1	1	2	0.01008	0.05040	0.05125
2	1	3	0.00744	0.03720	0.03875
3	2	4	0.00744	0.03720	0.03875
4	3	4	0.01272	0.06360	0.06375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 14 บัส

Bus Data											
Bus No	Bus Name	Bus Type	Mw Gen.	MVar Gen.	Mw Load	MVar Load	Volt (p.u)	Angle (deg)	Qmax Gen.	Qmin Gen.	Capacitor
1	Bus1	Swing	0.0	0.0	0.0	0.0	1.06	0.0	0	0	0
2	Bus2	PV	40.0	0.0	21.7	12.7	1.045	0.0	50	-40	0
3	Bus3	PV	0.0	0.0	94.2	19.0	1.010	0.0	40	0	0
4	Bus4	PQ	0.0	0.0	47.8	-3.9	1.0	0.0	0	0	0
5	Bus5	PQ	0.0	0.0	7.6	1.6	1.0	0.0	0	0	0
6	Bus6	PV	0.0	0.0	11.2	7.5	1.07	0.0	24	-6	0
7	Bus7	PQ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0	0	0
8	Bus8	PV	0.0	0.0	0.0	0.0	1.09	0.0	24	-6	0
9	Bus9	PQ	0.0	0.0	29.5	16.6	1.0	0.0	0	0	0.19
10	Bus10	PQ	0.0	0.0	9.0	5.8	1.0	0.0	0	0	0
11	Bus11	PQ	0.0	0.0	3.5	1.8	1.0	0.0	0	0	0
12	Bus12	PQ	0.0	0.0	6.1	1.6	1.0	0.0	0	0	0
13	Bus13	PQ	0.0	0.0	13.5	5.8	1.0	0.0	0	0	0
14	Bus14	PQ	0.0	0.0	14.9	5.0	1.0	0.0	0	0	0

Line Data					
Line No	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0264
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0246
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0219
4	2	4	0.05811	0.17632	0.0187
5	2	5	0.05695	0.17388	0.0170
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0173
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0064
8	6	11	0.09498	0.19890	0.0
9	6	12	0.12291	0.25581	0.0
10	6	13	0.06615	0.13027	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Line Data					
Line No	Form Bus	To Bus	R (p.u)	X (p.u)	Half Line Charging
11	7	8	0.0	0.17615	0.0
12	7	9	0.0	0.11001	0.0
13	9	10	0.03181	0.08450	0.0
14	9	14	0.12711	0.27038	0.0

Transformer Data					
Transformer No.	Form Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Tap Setting
1	4	7	0.0	0.20912	0.978
2	4	9	0.0	0.55618	0.969
3	5	6	0.0	0.25202	0.932

แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 30 บัส

Bus Data											
Bus No	Bus Name	Bus Type	Mw Gen.	MVar Gen.	Mw Load	MVar Load	Volt (p.u)	Angle (deg)	Qmax Gen.	Qmin Gen.	Capacitor
1	Glen-Lyn	Swing	0.0	0.0	0.0	0.0	1.060	0.0	0.0	0.0	0
2	Claytor	PV	40.0	0.0	21.7	12.7	1.045	0.0	50	-40.0	0
3	Kumis	PQ	0.0	0.0	2.4	1.2	1.000	0.0	0.0	0.0	0
4	Hancock	PQ	0.0	0.0	7.6	1.6	1.000	0.0	0.0	0.0	0
5	Fiedale	PV	0.0	0.0	94.2	19.0	1.000	0.0	40	-40.0	0
6	Roanoke	PQ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bus Data

Bus No	Bus Name	Bus Type	Mw Gen.	MVar Gen.	Mw Load	MVar Load	Volt (p.u)	Angle (deg)	Qmax Gen.	Qmin Gen.	Capacitor
7	Blaine	PQ	0.0	0.0	22.8	10.9	1.000	0.0	0.0	0.0	0
8	Reusens	PV	0.0	0.0	30.0	30.0	1.010	0.0	40.0	-10.0	0
9	Roa noke	PQ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0
10	Roa noke	PQ	0.0	0.0	5.8	2.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.19
11	Roa noke	PV	0.0	0.0	0.0	0.0	1.082	0.0	24.0	-6.0	0
12	Hancock	PQ	0.0	0.0	11.2	7.5	1.000	0.0	0.0	0.0	0
13	Hancock	PV	0.0	0.0	0.0	0.0	1.071	0.0	24.0	-6.0	0
14	14Bus	PQ	0.0	0.0	6.2	1.6	1.000	0.0	0.0	0.0	0
15	15Bus	PQ	0.0	0.0	8.2	2.5	1.000	0.0	0.0	0.0	0
16	16Bus	PQ	0.0	0.0	3.5	1.8	1.000	0.0	0.0	0.0	0
17	17Bus	PQ	0.0	0.0	9.0	5.8	1.000	0.0	0.0	0.0	0
18	18Bus	PQ	0.0	0.0	3.2	0.9	1.000	0.0	0.0	0.0	0
19	19Bus	PQ	0.0	0.0	9.5	3.4	1.000	0.0	0.0	0.0	0
20	20Bus	PQ	0.0	0.0	2.2	0.7	1.000	0.0	0.0	0.0	0
21	21Bus	PQ	0.0	0.0	17.5	11.2	1.000	0.0	0.0	0.0	0
22	22Bus	PQ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0
23	23Bus	PQ	0.0	0.0	3.2	1.6	1.000	0.0	0.0	0.0	0
24	24Bus	PQ	0.0	0.0	8.7	6.7	1.000	0.0	0.0	0.0	0.043
25	25Bus	PQ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0
26	26Bus	PQ	0.0	0.0	3.5	2.3	1.000	0.0	0.0	0.0	0
27	27Cloverdale	PQ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0
28	28Cloverdale	PQ	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0
29	29Bus	PQ	0.0	0.0	2.4	0.9	1.000	0.0	0.0	0.0	0
30	30Bus	PQ	0.0	0.0	10.6	1.9	1.000	0.0	0.0	0.0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Line Data					
Line No	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0204
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0184
4	2	5	0.0472	0.1983	0.0209
5	2	6	0.0581	0.1763	0.0184
6	3	4	0.0132	0.0379	0.0042
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0102
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0085
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0045
11	6	28	0.0169	0.0599	0.0065
12	8	28	0.0636	0.2000	0.0214
13	9	10	0.0000	0.1100	0.0000
14	9	11	0.0000	0.2080	0.0000
15	10	20	0.0936	0.2090	0.0000
16	10	17	0.0324	0.0845	0.0000
17	10	21	0.0348	0.0749	0.0000
18	10	22	0.0727	0.1499	0.0000
19	12	13	0.0000	0.1400	0.0000
20	12	14	0.1231	0.2559	0.0000
21	12	15	0.0662	0.1304	0.0000
22	12	16	0.0945	0.1987	0.0000
23	14	15	0.2210	0.1997	0.0000
24	15	18	0.1073	0.2185	0.0000
25	15	23	0.1000	0.2020	0.0000
26	16	17	0.0824	0.1923	0.0000
27	18	19	0.0639	0.1292	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Line Data					
Line No	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging
28	19	20	0.0340	0.0680	0.0000
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0000
30	22	24	0.1150	0.1790	0.0000
31	23	24	0.1320	0.2700	0.0000
32	24	25	0.1885	0.3292	0.0000
33	25	26	0.2544	0.3800	0.0000
34	25	27	0.1093	0.2087	0.0000
35	27	29	0.2198	0.4153	0.0000
36	27	30	0.3202	0.6027	0.0000
37	29	30	0.2399	0.4533	0.0000

Transformer Data					
Transformer No.	Form Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Tap Setting
1	4	12	0.0	0.2560	0.932
2	6	9	0.0	0.2080	0.978
3	6	10	0.0	0.5560	0.969
4	28	27	0.0	0.3960	0.968

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีโดยตลอดมาของ รศ.มณฑล ดีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว และ อาจารย์ เซาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับโครงการวิจัย ตรวจสอบให้คำแนะนำในการแก้ไขปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบงานวิจัยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตรวจสอบแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจให้แก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือต่างในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายสุรศักดิ์ อินทวิเลิศ

นายโสภณ แสงทอง

เอกสารอ้างอิง

- (1) Jonh J. Grainger and William D. Stevenson, “ Power System Analysis”,McGraw-Hill,1994
- (2) Stevenson, William D. , “Element of Power System Analysis”,McGraw-Hill,1982
- (3) Glenn W. Stagg and Ahmed H. El-Abiad, “Computer Method in power System Analysis”, McGraw-Hill,1987
- (4) Behic R. Gungor, “Power System”,Harcourt Brace Jovanovich,Publishers
- (5) ชำนาญ ห่อเกียรติม,“การวิเคราะห์ระบบกำลังไฟฟ้า”,ภาควิศวกรรมไฟฟ้า,คณะวิศวกรรมศาสตร์,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2532
- (6) <http://www.library.gsfc.nasa.gov/EJournals/ieee>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้