



ชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง  
The experiment of power flow analysis in power system

นายจตุรนต์ กองชิต

นายรชต คงทอง

นายสตายุ ใฝ่กระจายทรัพย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

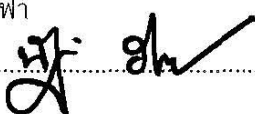
หัวข้อปริญญานิพนธ์	ชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
โดย	นายจตุรนต์ กองชิต นายรชต คงทอง นายสตา俞 ฝักระจายทรัพย์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบ ชุดทดลองการ วิเคราะห์การ ไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้สำหรับศึกษาระบบปฏิบัติการของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง อันประกอบไปด้วยการศึกษา กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ แรงดันและมุมของแ แรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้เป็นแนวทางประกอบการวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งผลจากการทดลองจะช่วยให้คำนวณแรงดันที่จุดต่างๆในระบบ กำลังงานสูญเสียในระบบ ตลอดจนใช้วินิจฉัยหาแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น แรงดันตกในระบบหรือการลัดวงจร เป็นต้น อันเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวางแผนทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

(ปริญญานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 72 หน้า)

คำสำคัญ : การไหลของกำลังไฟฟ้า

..........อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

## II

Project Report Outdoor lighting system using solar energy  
By Mr.Chaturon Konchit  
Mr.Rachata kongthong  
Mr.Sadayu Faikrajaisap  
Advisor Dr.Natthachote Rugthaicharoencheep  
Degree of Bachelor of Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Academic Year 2012

### ABSTRACT

This thesis presents the design and construction of an experiments of the power flow in the power systems. For the operating system of the power flow in the power systems. Comprise with the real power, Reactive power, Voltage in the power system. To guide the planning and operation of power systems. The results of the experiment to calculate the pressure at various points in the Power loss of system. As well as finding solutions to problems. Occurring in the system, such as under voltage or short circuit in the system. This is the basic of stability analysis of power system operation and planning.

(Total 72 pages)

Keywords: Power flow

.....Advisor

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำแนะนำในด้านการออกแบบของโครงการ รวมทั้งขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมในส่วนที่ควรปรับปรุงแก้ไข และขอขอบคุณ เพื่อนๆที่เป็นกำลังใจให้ รวมทั้งผู้ที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ สำนักงานสนับสนุนงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ในการ สนับสนุนเงินทุนในการจัดทำโครงการ ขอขอบคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและ ช่วยเหลือในการทำโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีต่อข้าพเจ้า



จตุรนต์	กองชิต
รชต	คงทอง
สดาญ์	ไผ่กระจายทรัพย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ลักษณะชิ้นงาน	1
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง	3
2.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า	7
2.4 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ วิธีนิวตัน - رافสัน	36
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	37
3.1 บทนำ	37
3.2 โครงสร้างตู้ ชุดทดลอง	37
3.3 วาริแอก	38
3.4 อุปกรณ์แทนค่าความต้านทานของสายส่งระยะสั้น	39
3.5 อุปกรณ์แทนค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งระยะสั้น	40
3.6 เพาเวอร์มิเตอร์	44
3.7 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า	44

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.8 ฟิวต์ตัดต่อวงจรของเพาเวอร์มิเตอร์	45
3.9 เบรกเกอร์ตัดต่อวงจรของระบบทั้งหมด	45
3.10 หลอดไฟแสดงสถานะ เปิด-ปิด ระบบไฟฟ้า	46
3.11 สวิตช์ ปลดสับสายส่งและไฟแสดงสถานะ	46
3.12 สวิตช์ฉุกฉิน	46
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบ</b>	<b>47</b>
4.1 บทนำ	47
4.2 ผลการทดสอบการใช้งานชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า	47
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	47
4.4 ผลการทดลองตามกรณีศึกษา	48
4.5 สรุปกรณีศึกษา	58
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>61</b>
5.1 บทนำ	61
5.2 สรุปผลการทดลอง	61
5.3 ปัญหาโครงการและแนวทางแก้ไข	61
5.4 ข้อเสนอแนะ	61
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>62</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>63</b>
<b>ประวัติผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์</b>	<b>70</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1	7
ตารางที่ 2.2	12
ตารางที่ 2.3	22
ตารางที่ 3.1	39
ตารางที่ 3.2	41
ตารางที่ 3.3	42
ตารางที่ 4.1	48
ตารางที่ 4.2	49
ตารางที่ 4.3	50
ตารางที่ 4.4	51
ตารางที่ 4.5	52
ตารางที่ 4.6	53
ตารางที่ 4.7	54
ตารางที่ 4.8	55
ตารางที่ 4.9	56

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนภาพการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	3
ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด	4
ภาพที่ 2.3 บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง	5
ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของสายส่ง	7
ภาพที่ 2.5 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส	8
ภาพที่ 2.6 เฟสเซอร์ไดอะแกรม	10
ภาพที่ 2.7 แบทเตอร์กำลังถูกประจุเมื่อ E และ I เป็นบวกเป็นลบทั้งคู่	11
ภาพที่ 2.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ	12
ภาพที่ 2.9 การจ่ายและรับกำลังไฟฟ้า	12
ภาพที่ 2.10 แนวความคิดการหาสูตรประมาณค่าคำตอบด้วยวิธีนิวตันราฟสัน	18
ภาพที่ 2.11 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	24
ภาพที่ 2.12 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส	25
ภาพที่ 2.13 ระบบไฟฟ้าจำนวน 3 บัสในการหาจาโคเบียน	31
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของตู้ชุดทดลอง	38
ภาพที่ 3.2 ชุดภาระทางไฟฟ้า	38
ภาพที่ 3.3 วาริแอก	38
ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์แทนค่าความต้านทานของสายส่ง	39
ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์แทนค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง	40
ภาพที่ 3.6 ระยะเวลาวางสายส่งที่ความห่าง 24 ฟุตต่อเส้น	41
ภาพที่ 3.7 การพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำ	42
ภาพที่ 3.8 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดลวด	43
ภาพที่ 3.9 เพาเวอร์มิเตอร์	44
ภาพที่ 3.10 หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า	44
ภาพที่ 3.11 ฟิวส์ตัดต่อวงจรของเพาเวอร์มิเตอร์	45
ภาพที่ 3.12 เบรกเกอร์ตัดต่อวงจรของระบบไฟฟ้า	45
ภาพที่ 3.13 หลอดไฟแสดงสถานะ เปิด - ปิด ระบบไฟฟ้าของตู้จำลองสายส่ง	46
ภาพที่ 3.14 สวิตช์ปลดสับสายส่ง และไฟแสดงสถานะ	46
ภาพที่ 3.15 สวิตช์ฉุกเฉิน	46



## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.1 แพลนหน้าตู้	47
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันในระบบและแรงดันของบัส (โหลดระดับ 3)	58
ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของระดับโหลดกับแรงดันที่บัส (แรงดันระบบ 100 V)	58
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์กรณีศึกษาเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าปรากฏ (โหลดระดับ 3)	59
ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์โหลดกับแรงดัน	59
ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์โหลดกับแรงดัน (แรงดันที่บัส 100 V)	60



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การศึกษาระบบไฟฟ้าในด้านสถานะคงตัว (steady-state) ของระบบไฟฟ้าโดยจะพิจารณากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และตัวประกอบกำลัง (power factor) และความสูญเสีย ซึ่งเป็นพื้นฐานของการศึกษาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการศึกษาคาร์เทิลของกำลังไฟฟ้า (load flow) นั้นเป็นการศึกษาที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการจำลองในการวางแผนระบบไฟฟ้าและการพิจารณารูปแบบการจัดระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ รวมไปถึงการพิจารณาเหตุการณ์ที่ไม่คาดการณ์ (contingency) ของระบบไฟฟ้า เช่น การปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลง

การศึกษาสิ่งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงเหตุการณ์และผลที่จะตามมาในเหตุการณ์นั้นๆ เช่น ในกรณีที่อยู่เกินภาระหรือโอเวอร์โหลด (over load) หรือสภาพแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เพื่อปรับปรุงแรงดันและตัวประกอบกำลัง การศึกษาคาร์เทิลของกำลังไฟฟ้า เป็นการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการศึกษาระบบไฟฟ้าทั่วไปเพื่อที่จะนำไปให้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาวางแผน และขยายระบบไฟฟ้า

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบปฏิบัติการของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.2 เพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ แรงดันและมุมของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.3 . เพื่อใช้เป็นแนวทางประกอบการวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังมีจำนวน 3 บัส
- 1.3.2 สายส่งที่จำลองระหว่างบัสเป็นแบบจำลองสายส่งระยะสั้น
- 1.3.3 ทดลองการไหลของระบบไฟฟ้าตามใบงานจำนวน 2 ใบงาน
- 1.3.4 ใบงานทดสอบสถานะ Best case
- 1.3.5 ใบงานทดสอบสถานะฉุกเฉิน

### 1.4 ลักษณะของชิ้นงาน

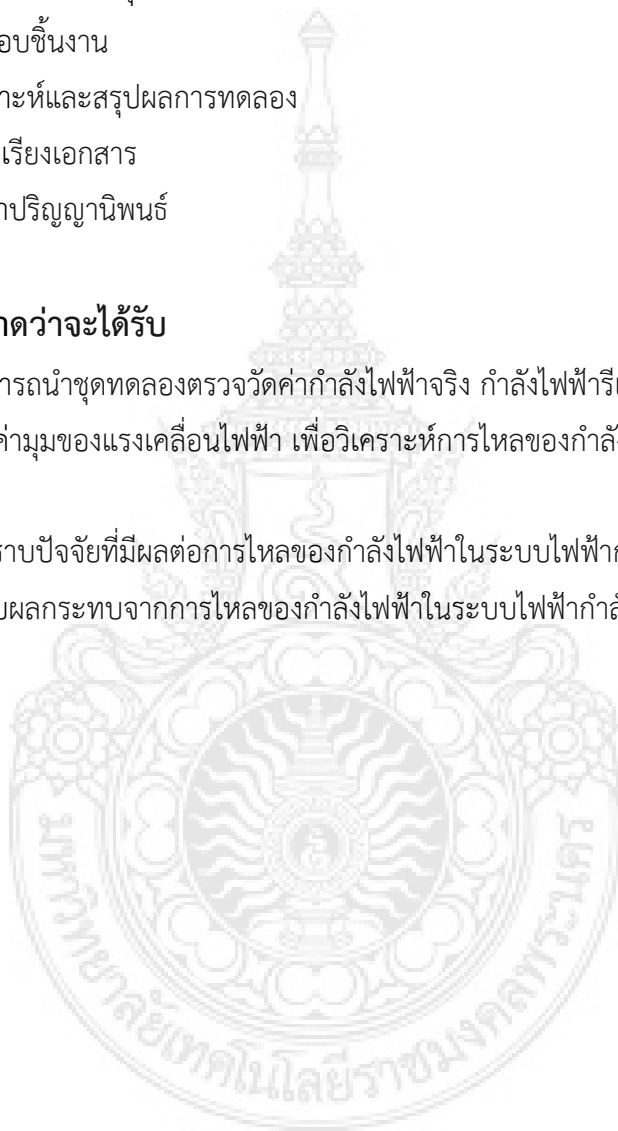
ตู้แบบจำลองบัสทางไฟฟ้า 3 บัส

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
- 1.5.2 ออกแบบวงจรชุดจำลองสายส่งระยะกลาง
- 1.5.3 ออกแบบและคำนวณค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์
- 1.5.4 ทำการสั่งซื้ออุปกรณ์ที่คำนวณได้
- 1.5.5 ทำการประกอบอุปกรณ์ชิ้นงาน
- 1.5.6 ทดสอบชิ้นงาน
- 1.5.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.5.8 เรียบเรียงเอกสาร
- 1.5.9 จัดทำปริญญานิพนธ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถนำชุดทดลองตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่ามุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.6.2 ได้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.6.3 ทราบผลกระทบจากการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

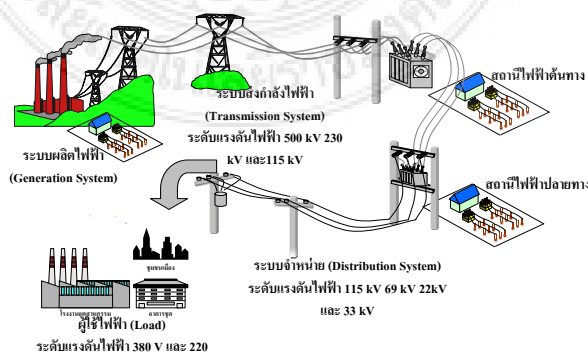
### 2.1 บทนำ

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นการศึกษาระบบไฟฟ้าในด้านสภาวะคงตัว (steady-state) ของระบบไฟฟ้า โดยจะพิจารณากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และ ตัวประกอบกำลัง(power factor) และความสูญเสีย ซึ่งถือว่าเป็นพื้นฐานของการศึกษาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า (load flow) นั้นเป็นการศึกษาที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการจำลองในการวางแผนระบบไฟฟ้า และการพิจารณารูปแบบการจัดการ ระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการพิจารณาเหตุการณ์ที่ไม่คาดการณ์ (contingency) ของระบบไฟฟ้า เช่นการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลงซึ่งการศึกษาเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงเหตุการณ์และผลที่จะตามมา ในเหตุการณ์นั้นๆ เช่น ในกรณีที่ถูกกรรมทำงานเกินภาระ หรือโอเวอร์โหลด (over load) หรือสภาพแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการศึกษาระบบไฟฟ้าทั่วไปเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการพิจารณาการวางแผนและขยายระบบไฟฟ้า รูปแบบการควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้า

### 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง

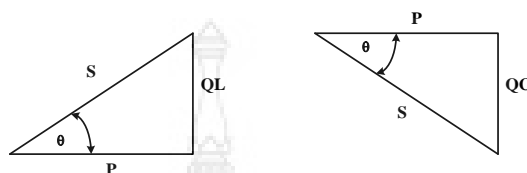
#### พื้นฐานโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการจะศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น พึงทำความเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังก่อน เนื่องจากการไหลของไฟฟ้ากำลังนั้นมีการไหลเป็นระบบ ด้วยเริ่มต้นตั้งแต่ระบบผลิตทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าสลับให้กับระบบไฟฟ้าซึ่งก็คือโรงไฟฟ้าต่างๆ อาทิ โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเป็นต้น ระบบต่อมาก็คือระบบส่งทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังพื้นที่ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า ส่วนระบบสุดท้ายคือระบบจำหน่าย ซึ่งระบบทั้ง 3 ได้แสดงดังรูปภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แผนภาพการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลังก็คือกำลังไฟฟ้า เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีการไหลในระบบตามความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า [1] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาระทางไฟฟ้า โดยจากลักษณะภาระทางไฟฟ้าต่างๆ ทำให้เกิด กำลังไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ คือ กำลังไฟฟ้าจริง (Real power) กำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) โดยลักษณะของกำลังไฟฟ้าทั้งสามแบบสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมกำลังทางไฟฟ้างดังรูปที่ 2.2



(ก) ไคอะแกรมกำลังของโหลดอินดักทีฟ (ข) ไคอะแกรมกำลังของโหลดคาปาซิทีฟ

ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด

### 2.2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

สิ่งที่คำนึงมากที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลังก็คือเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังหมายถึงความสามารถของระบบไฟฟ้าในการรักษาสมดุลของการทำงานภายใต้สภาพการทำงานปกติและยังต้องสามารถที่จะต้องนำระบบกลับสู่สภาพสมดุลที่ยอมรับได้ภายหลังการเกิดการรบกวนในระบบ โดยเสถียรภาพทางไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือเสถียรภาพทางมุม (Angular Stability)[2] และเสถียรภาพทางแรงดัน (Voltage Stability) ในส่วนของเสถียรภาพทางมุมซึ่งก็คือมุมของแรงดันทางไฟฟ้าที่เป็นที่ยอมรับคือค่าเฟาเวอร์แฟกเตอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 0.85 ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการนำซิงโครนสมอเตอร์วิ่งตัวเปล่าเพื่อชดเชยมุมที่ขาดหายไป ส่วน เสถียรภาพทางแรงดัน ค่าที่ยอมรับได้จะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ คือแรงดันระหว่าง 0.95-1.05 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากไม่ได้เป็นที่ยอมรับก็สามารถแก้ไขโดยนำคาปาซิเตอร์มาชดเชยแรงดันที่ขาดหายไป

จากความสำคัญของเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งต่อการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการควบคุมการไหลของไฟฟ้ากำลังได้ก็คือการสามารถควบคุมเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั่นเอง

## 2.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

### 2.3.1 ตัวแปรในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

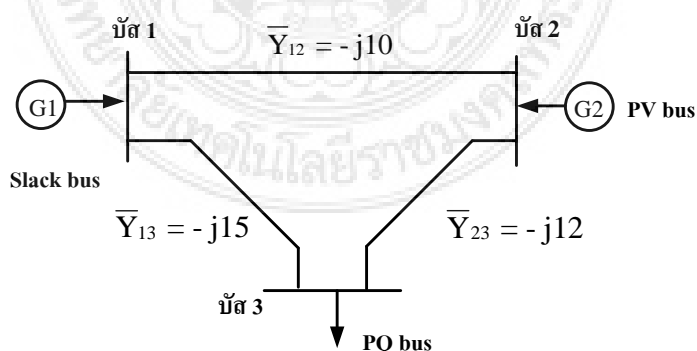
ในแต่ละบัสของวงจรที่มีค่าทางฟิสิกส์ที่แปรผันได้ 4 ค่า รวมอยู่ด้วยกัน ดังนี้

- (1) ค่ากำลังไฟฟ้าจริง
- (2) ค่ากำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ
- (3) ค่าขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า
- (4) ค่ามุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

จากค่าทั้งหมด 4 ค่านี้ จะเป็นค่าที่แปรเปลี่ยนและจะถูกกำหนดค่าไว้ ในขณะที่ค่าอื่นๆ อีก 2 ค่า เป็นสิ่งที่ต้องการทราบค่าแต่ด้วยเหตุที่ว่าค่าไฟฟ้าที่ผลิตออกมาและโหลดผู้ใช้นั้นเป็นค่าทางฟิสิกส์ ดังนั้น ค่าของเงื่อนไขทางไฟฟ้าต่างๆ ของแต่ละบัสนั้นจะถูกกำหนดให้อยู่ในเทอมของค่ากำลังไฟฟ้าจริง และค่าของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้า ก็คือ การคำนวณหาค่าของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ไหลในแต่ละสายส่งไฟฟ้า รวมทั้งเป็นการคำนวณหาค่าขนาด (magnitude) และค่าของมุม (phase angle) ของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแต่ละบัสของระบบสายส่งที่กำหนดไว้ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดในสถานะของการทำงานลักษณะต่างๆ นั้น ค่ารายละเอียดที่คำนวณหาได้จากการโหลดโพล้ว ก็ยังสามารถใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำงานของระบบไฟฟ้า ความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดผู้ใช้ไฟฟ้า โดยไม่ทำให้ระบบสายส่งเกิดการโอเวอร์โหลด รวมทั้งมีค่าระดับของแรงเคลื่อน (voltage regulation) ที่ดี โดยมีวิธีการควบคุมระดับของแรงดันไฟฟ้าโดยการใช้การขนานตัวเก็บ ประจุ (shunt capacitor) การขนานรีแอกเตอร์ (shunt reactor) และการปรับแก้หม้อแปลง (tap-changing transformer) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตค่าของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) แต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการผลิตค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) เลย หรือที่เรียกว่า ซิงโครนัส คอนเดนเซอร์ (synchronous condenser)

### 2.3.2 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

บัส คือ สัญลักษณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้แทนส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหรือส่วนที่เป็นโหลดก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 บัสที่ 1 และ บัสที่ 2 เป็นบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ และบัสที่ 3 เป็นบัสที่มีโหลดเชื่อมต่อ



ภาพที่ 2.3 บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการศึกษาในการจ่ายโหลด หรือการกระจายของโหลดจำเป็นจะต้องมีข้อมูลในการวิเคราะห์ คือ จะต้องมึแผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่จำเป็นสำหรับหา  $Y_{bus}$  หรือ  $Z_{bus}$  อิมพีแดนซ์และขนาดพิกัดของหม้อแปลง ขนาดพิกัดของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานกับสายส่ง เป็นต้น โดยทั่วไปปัญหาในเรื่องการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นจะมีการแบ่งชนิดของบัสทางไฟฟ้าออกได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

**2.3.2.1 บัสสลैค (slack bus)** บัสชนิดนี้บางครั้งก็เรียกว่าสวิงบัส (swing bus) หรือ บัสอนันต์ (infinite bus) หรือบัสอ้างอิง (reference bus) หรือบัสแรงดันความถี่คงที่ (constant voltage and frequency bus) บัสชนิดนี้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ มุมคงที่และโดยทั่วไปกำหนดให้เป็นมุมศูนย์โดยใช้บัสอ้างอิงที่มุมของบัสอื่นทั้งระบบจะมาเทียบกับบัสนี้ บัสดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดใหญ่ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าออกมาตามต้องการได้โดยขนาดแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติบัสที่จะถือเป็นบัสอ้างอิงนี้ หมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่ออยู่ หรือเป็นระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ พารามิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่สำหรับบัสนี้ก็คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้าส่วน  $P$  และ  $Q$  ของบัสนี้หาได้จากการศึกษาโหลดโพล้วพิจารณาภาพประกอบ เพื่อให้เข้าใจสแลค บัสและพารามิเตอร์ของบัส

**2.3.2.2 บัสควบคุมแรงดัน (voltage-controlled bus) หรือ บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator bus)** บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่และบัสดังกล่าวสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ได้ถ้าต้องการ โดยอาศัย AVR (automatic voltage regulator) ดังนั้นขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสมีค่าคงที่  $|V|$  กำลังไฟฟ้าบัสจริง  $P$  มีค่าคงที่ (ได้มาจากการคำนวณการใช้เชื้อเพลิงของระบบต่ำสุด และตั้งให้มีค่าคงที่ตามที่ได้คำนวณออกมา ) บัส ชนิดนี้บางครั้งก็เรียกว่า พีวี บัส (PV bus) ถ้าบัสเครื่องกำเนิดเป็นชนิด PV บัส ซึ่งเป็นบัสที่รู้ค่า  $P$  และ  $|V|$  คงที่ พารามิเตอร์ที่ต้องหาค่าจากโหลดโพล้ว ก็คือ  $Q$  และ  $\angle\delta$  พิจารณาภาพประกอบ 2 เพื่อให้เข้าใจบัสเครื่องกำเนิดและพารามิเตอร์ของบัส

**2.3.2.3 บัสโหลด (load bus)** บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ซึ่งทราบค่ากำลังไฟฟ้าจริง  $P$  และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ  $Q$  หรือบางครั้งก็เรียกว่า PQ บัส ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการศึกษาโหลดโพล้วคือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า  $|V|$  และมุมของแรงดันไฟฟ้า  $\angle\delta$

โดยปกติแล้วในระบบไฟฟ้ากำลังนี้ค่ากำลังที่สูญเสียในสายส่งจะมีความสัมพันธ์กันกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมากำหนดตามความต้องการไม่ได้เพราะว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง จะถูกใช้ ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และจะมากขึ้นเมื่อมีค่า

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ดังนั้นที่บัสอ้างอิงจะทราบขนาดและค่ามุมของแรงดันไฟฟ้า ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าจริง  $P$  และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ  $Q$  จะต้องทำการคำนวณหาค่าในการคำนวณนั้นจะต้องทราบค่าของแรงดันไฟฟ้าที่บัสทั้งหมดก่อน จึงทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่บัสอ้างอิงได้ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องทราบค่ากำลังไฟฟ้าจริงและขนาดของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละบัสก่อนเพราะว่าค่า  $P$  และ  $V$  ควบคุมได้โดยใช้เครื่องกักกันด้วยตัวบังคับ (governor) การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง  $P$  ใช้วิธีควบคุมแรงขับของต้นกำลัง ส่วนแรงดันไฟฟ้า  $V$  ทำการควบคุมได้ที่วงจรมอเตอร์ สำหรับโหลดบัสเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า PQ บัส เพราะว่าค่า  $P$  และ  $Q$  ถูกกำหนดโดยโหลดบัส

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของการแบ่งแยกชนิดของแต่ละบัส

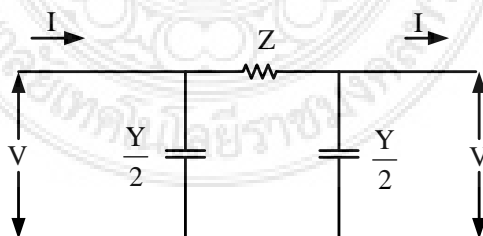
ชนิดของบัส	ปริมาณที่ทราบค่า	ปริมาณที่ไม่ทราบค่า
สแลคบัส (slack bus)	$ v , \delta$	$P, Q$
บัสควบคุมแรงดัน (PV bus)	$P,  v $	$\delta, Q$
โหลดบัส (PQ bus)	$P, Q$	$ v , \delta$

### 2.3.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

#### 2.3.3.1 การแก้ปัญหาการไหลของกำลังงานไฟฟ้า (load flow problem)

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเครือข่ายของระบบไฟฟ้ากำลังที่จำลองอยู่ในรูป  $Y_{bus}$  และ  $Z_{bus}$  ถึงแม้ว่าสามารถใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังงานไฟฟ้า แต่จำกัดวิธีโดยใช้ข้อมูลเพียง  $Y_{bus}$  ของระบบไฟฟ้าเท่านั้นโดยเริ่มจากข้อมูลที่ต้องทราบเพื่อใช้ในการคำนวณ คือ

1. ไดอะแกรมเส้นเดียวที่ใช้แสดงแทนการต่อวงจรของระบบ
2. วงจรสมมูลของสายส่งที่แทนด้วยวงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของสายส่งแบบ  $\pi$

2.3.3.2 ข้อมูลอื่นๆ ที่จำเป็น เช่น ขนาดพิกัดและอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงขนาดของ shunt capacitor และการตั้งค่าแท๊ปของหม้อแปลง



สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้แก้ปัญหาโหลดโพล์วของระบบไฟฟ้ากำลังที่สำคัญมีอยู่ 2 สมการด้วยกันคือ

1. สมการแรงดันไฟฟ้า
2. สมการกำลังไฟฟ้า

สมการกำลังไฟฟ้าที่เข้าบัส  $k$  ใดๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ดังนี้

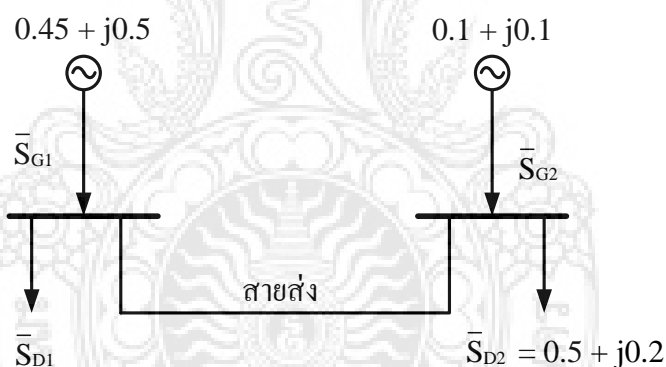
$$S_k = V_k I_k \quad (2.01)$$

เมื่อ

$V_k$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส  $k$

$I_k$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส  $k$

สมการนี้มาจากสมมติฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ  $S_k$  จะมีค่าเป็นบวก สำหรับกรณีโหลดล่าหลัง (lagging) นั่นคือเวกเตอร์กระแส  $I_k$  จะตามหลังเวกเตอร์แรงดัน  $V_k$  กำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นจะไหลเข้าระบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส

กำลังไฟฟารวมที่บัส 1

$$S_1 = (0.45 + j0.5) - (0.2 + j0.1) = 0.25 + j0.4$$

กำลังไฟฟารวมที่บัส 2

$$S_2 = (0.1 + j0.1) - (0.5 + j0.2) = -0.4 - j0.1$$

จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเป็นลบเมื่อต้องการหากำลังไฟฟารวมของบัสทั้งนี้เพราะกำลังไฟฟ้าที่บัสถูกนิยามว่าเป็นกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสตามทิศทางกระแสไฟฟ้า  $I_k$  ที่ไหลเข้าบัส

โดยที่

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (2.02)$$

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* I_k \quad (2.03)$$

หากกระแสที่ไหลผ่านบัส  $k$  จากสมการที่จะได้ว่า

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (2.04)$$

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

$$I_k = Y_{k1} V_1 + Y_{k2} V_2 + \dots + Y_{kn} V_n = \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \quad (2.05)$$

แทนค่ากระแสไฟฟ้า  $I_k$  จากสมการที่ (2.05) ในสมการที่ (2.04) จะได้

$$I_k = Y_{k1} V_1 + Y_{k2} V_2 + \dots + Y_{kn} V_n = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (2.06)$$

จัดรูปสมการที่ (2.06) ใหม่ จะได้

$$Y_{kk} V_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - (Y_{kn} V_n + Y_{k2} V_2 + \dots + Y_{k(k-1)} V_{k-1} + \dots + Y_{k+1} + \dots + Y_{kn} V_n) \quad (2.07)$$

ดังนั้น แรงแดันไฟฟ้าที่บัสใดๆ มีค่าดังนี้

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[ \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.08)$$

จากสมการนี้เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) โดยสมการที่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแรงแดันไฟฟ้าบัสและแอดมิตแตนซ์ของระบบได้ โดยแทนสมการที่ (2.05) เข้าไปในสมการที่ (2.04) จะได้สมการกำลังไฟฟ้างี้

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* \left[ \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.10)$$

กำลังไฟฟ้าจริง

$$P_k = \text{Re} \left[ V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.11)$$

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

$$Q_k = -\text{Im} \left[ V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad (2.12)$$

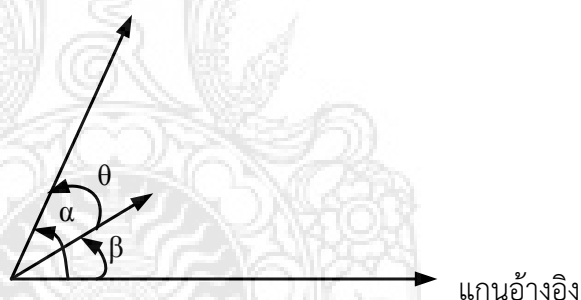
กำหนดให้

Re คือ ส่วนค่าจริง real part

Im คือ ส่วนค่าจินตภาพ imaginary part

### 2.3.4 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดคือ  $V$  เท่ากับ  $|V| \angle \alpha^\circ$  และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าโหลด คือ  $I$  เท่ากับ  $|I| \angle \beta^\circ$  โดยที่แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทำมุมกับแกนอ้างอิงดังแสดง ในภาพที่ 2.6 กำลังไฟฟ้าปรากฏ  $S$  (apparent power) จะมีค่าเท่ากับผลคูณของขนาดแรงดันไฟฟ้าและค่าคอนจูเกจ (conjugate) ของกระแสไฟฟ้า (



ภาพที่ 2.6 เฟสเซอร์ไดอะแกรม

กำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$\begin{aligned} S &= VI^* = |V| \angle \alpha^\circ \times |I| \angle -\beta^\circ \\ &= |V| \cdot |I| \angle \alpha - \beta \\ &= |V| \cdot |I| \cos(\alpha - \beta) + j |V| \cdot |I| \sin(\alpha - \beta) \\ &= |V| \cdot |I| \cos\theta + j |V| \cdot |I| \sin\theta \end{aligned}$$

โดยมุม  $(\alpha - \beta)$  คือมุมระหว่างเฟสของแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) และกระแสไฟฟ้า ( $I$ )

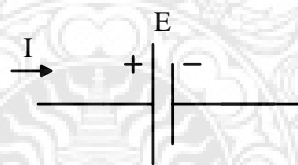
กำหนดให้กำลังไฟฟ้าปรากฏ  $S = P_k + jQ_k$

$$\text{ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริง} \quad P = |V| \cdot |I| \cos\theta$$

$$\text{และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ} \quad Q = |V| \cdot |I| \sin\theta$$

เมื่อกำหนดให้  $S = VI^*$  ถ้ามุม  $\alpha > \beta$  ซึ่งกระแสไฟฟ้า จะล้าหลังแรงดันไฟฟ้า  $V$  ทำให้ค่ากำลังรีแอกทีฟ  $Q$  จะมีเครื่องหมายเป็นบวกซึ่งแสดงว่าเป็นอินดักทีฟโหลด (inductive load) เมื่อมุม  $\alpha < \beta$  กระแสไฟฟ้า  $I$  จะนำหน้าแรงดันไฟฟ้า  $V$  ทำให้ค่ากำลังรีแอกทีฟ  $Q$  มีเครื่องหมายเป็นลบซึ่งแสดงว่าเป็นคาปาซิทีฟโหลด (capacitive load) ถ้ากำหนดให้  $(S = VI^*$  ค่ากำลังรีแอกทีฟ จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับที่กล่าวมานี้คือ  $Q$  เป็นบวกแสดงว่าเป็นคาปาซิทีฟโหลดและ  $Q$  เป็นลบแสดงว่าเป็นอินดักทีฟโหลด ในการที่จะทราบว่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ จ่ายเข้าหรือจ่ายออกจาก บัสใดๆ ในระบบส่งกำลังไฟฟ้านั้น จำเป็นจะต้องมีหลักการเบื้องต้นซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

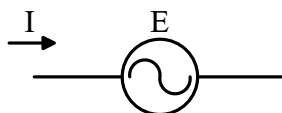
ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงนั้น การที่จะทราบว่าจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกหรือเข้าในระบบ โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 3.10 กระแสไฟฟ้าไหลเข้า ขั้วบวกของแบตเตอรี่ ถ้า  $I$  มีค่าเท่ากับ 10 แอมแปร์ และ  $E$  เท่ากับ 100 โวลต์ แสดงว่า แบตเตอรี่กำลังถูกประจุ (charge หรือ absorbing energy) ด้วยกำลังไฟฟ้าเท่ากับ  $(10 \times 100 = 1000$  วัตต์ และถ้ากระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลออกจากแบตเตอรี่โดยที่ทิศทางของกระแสไฟฟ้าในภาพที่ 2.7 ยังคงเดิม จะมีกระแสไฟฟ้าเท่ากับ -10 แอมแปร์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลออกจากขั้วบวกของแบตเตอรี่คายประจุออก (discharge หรือ delivering energy) ผลคูณของ  $E$  และ  $I$  จะเท่ากับ -1000 วัตต์



ภาพที่ 2.7 แบตเตอรี่กำลังถูกประจุ เมื่อ  $E$  และ  $I$  เป็นบวกหรือลบทั้งคู่

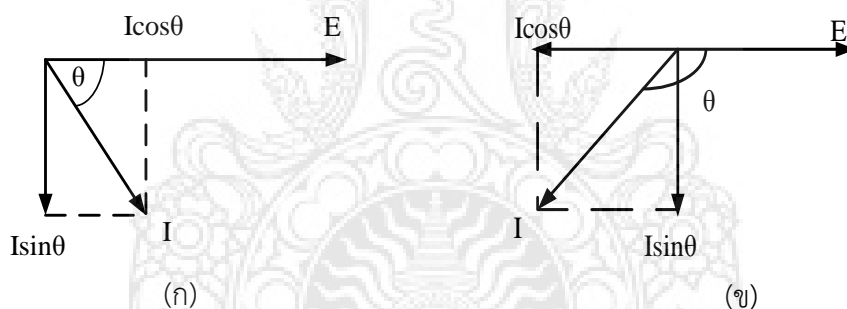
กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขั้วบวกของแบตเตอรี่ จะเป็นสภาวะของการประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ คือ  $E$  และ  $I$  จะเป็นบวก กำลังไฟฟ้า power หาได้จากผลคูณของ  $E$  และ  $I$  โดยจะมีเครื่องหมายเป็นบวกคือ แบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าเข้า แต่ถ้าเขียนทิศทางของกระแสไฟฟ้า  $I$  มีทิศทางกลับ กับที่แสดงในภาพที่ 3.10 จะเป็นสภาวะที่คายประจุออกจากแบตเตอรี่ ผลคูณของ  $E$  และ  $I$  จะมีเครื่องหมายเป็นลบนั่นคือแบตเตอรี่ปล่อยกำลังไฟฟ้าออกมา

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในภาพที่ 2.8 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าและความถี่คงที่ เครื่องหมายที่แสดงใน ภาพเป็นการแสดงในเวลาครึ่งหนึ่งพร้อมกันทั้งวงจร ในทำนองเดียวกันทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเวลาเดียวกันทั้งวงจร



ภาพที่ 2.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

พิจารณาภาพที่ 2.8 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสไฟฟ้ามีเครื่องหมายบวกเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลออกจากขั้วบวกของแบตเตอรี่ ผลคูณของ  $E$  และ  $I$  ที่แตกแกนมาอยู่ในแกน  $E$  คือกำลังไฟฟ้า  $P$  จะเท่ากับ  $EI \cos\theta$  และผลคูณของ  $E$  และ  $I$  ที่แตกแกนมาอยู่ในแกนที่ตั้งฉากกับ  $E$  คือ กำลังรีแอกทีฟ  $Z$  reactive power) ถ้ากระแสไฟฟ้าที่แตกแกนออกมาอยู่ในแกน  $E$  จะมีทิศทางตามแรงดันไฟฟ้า  $E$  ดังแสดงในภาพที่ 2.8 จะเป็นการจ่ายกำลังไฟฟ้า (supplies power) เข้าสู่ระบบไฟฟ้า คือ ส่วนแท้จริง (real part) ผลคูณ  $E \cdot I$  จะเป็นบวกซึ่งแสดงว่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าแตกแกนออกมาอยู่ในแกน  $E$  มีทิศตรงกันข้ามกับแรงดัน  $E$  แรงดัน ทำมุมกับ  $E$  เท่ากับ  $180^\circ$  ดังแสดง (ในภาพที่ 2.9 จะเป็นการรับกำลังไฟฟ้า จากระบบซึ่งแสดงว่าเป็นมอเตอร์หรือโหลดของระบบทำให้ส่วนแท้จริงของผลคูณ  $E \cdot I^*$  เป็นลบ



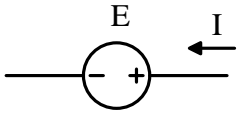
ภาพที่ 2.9 การจ่ายและรับกำลังไฟฟ้า

(ก) จ่ายไฟฟ้าออกสู่ระบบไฟฟ้า

(ข) รับไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าเป็นมอเตอร์หรือโหลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 2.2 ผลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเป็นการรับ-จ่ายโหลดเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์

วงจรแสดง	ผลคูณของ $EI^*$
<p>สมมติว่าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า</p>	<p><math>P</math> เป็น + จะเป็นการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ</p> <p><math>P</math> เป็น - จะเป็นการรับไฟฟ้าจากระบบ</p> <p><math>Q</math> เป็น + จะเป็นการจ่ายรีแอกทีฟ เข้าสู่ระบบ   ถัดหลัง <math>E</math></p> <p><math>Q</math> เป็น - จะเป็นการรับรีแอกทีฟ จากระบบ   นำหน้า <math>E</math></p>

 <p>สมมติว่าเป็นมอเตอร์</p>	<p>P เป็น + จะเป็นการรับไฟฟ้าจากระบบ</p> <p>P เป็น - จะเป็นการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ</p> <p>Q เป็น + จะเป็นการรับรีแอกทีฟ จากระบบ I ล้าหลัง E</p> <p>Q เป็น - จะเป็นการจ่ายรีแอกทีฟ เข้าสู่ระบบ I นำหน้า E</p>
--	--

สมการในการวิเคราะห์การจ่ายโหลด

สำหรับในกรณีที่มี n บัส สามารถหากระแสไฟฟ้าที่บัส k ใดๆ คือ

$$I_k = Y_{k1} V_1 + Y_{k2} V_2 + \dots + Y_{kk} V_k + \dots + Y_{kn} V_n \quad (2.13)$$

ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ที่บัส k คือ

$$S_k = V_k I_k^* = P_k + jQ_k$$

$$S_k^* = V_k^* I_k = P_k - jQ_k$$

ในการคำนวณหาโหลดโพล์จะมีตัวแปรอยู่ 2 ชนิดคือ ค่า  $P_k$ ,  $Q_k$  มุมแรงดัน และขนาดของแรงดัน โดยในแต่ละบัสของระบบจะต้องทราบค่าตัวแปร 2 ตัว และจะต้องคำนวณหาค่า 2 ตัว ดังนั้นจากสมการที่(2.13) เป็น สมการหาแรงดันไฟฟ้าที่บัส k สามารถเขียนเป็นสมการต่างๆ ไปได้คือ

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[ \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \right] \quad \text{โดยที่ } i = k \quad (2.14)$$

เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (2.14) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสมการที่ nonlinear ในการแก้สมการที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นนั้น สามารถคำนวณเพื่อแก้สมการของโหลดโพล์ ที่นำมาใช้ซึ่งพิจารณาได้วิธีการหลักๆ ด้วยกัน คือวิธีการของเกาส์วิธีการของเกาส์-ไซเดล และวิธีการของนิวตันราฟสัน

### 2.3.5 การหาคำตอบของสมการไม่เชิงเส้น

#### 2.3.5.1 การหาคำตอบด้วยวิธีเกาส์

วิธีการคำนวณแบบวนรอบด้วยวิธีเกาส์ (gauss iterative technique) วิธีการนี้ก็จะเป็นวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error method) ซึ่งก็จะได้ค่าผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำพอสมควร ขั้นตอนของวิธีการคำนวณมีดังต่อไปนี้

1. ให้สมมุติ หรือ เดาค่าเริ่มต้นค่าแรก
2. ค่าสมมุติให้แทนค่าลงไปในสมการดั้งเดิม เพื่อการคำนวณให้ได้ค่าใหม่







$$x_1^{(k)} = \frac{1}{a_{11}} \left[ y_1 - a_{12} x_2^{(k-1)} - a_{13} x_3^{(k-1)} \dots - a_{1n} x_n^{(k-1)} \right] ; k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.20)$$

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

$$x_2^{(k)} = \frac{1}{a_{22}} \left[ y_2 - a_{21} \boxed{x_1^{(k)}} - a_{23} x_3^{(k-1)} \dots - a_{2n} x_n^{(k-1)} \right] \quad (2.21)$$

$$x_3^{(k)} = \frac{1}{a_{33}} \left[ y_3 - a_{31} \boxed{x_1^{(k)}} - a_{32} \boxed{x_2^{(k)}} \dots - a_{3n} x_n^{(k-1)} \right] \quad (2.22)$$

และ

$$x_n^{(k)} = \frac{1}{a_{nn}} \left[ y_n - a_{n1} \boxed{x_1^{(k)}} - a_{n2} \boxed{x_2^{(k)}} \dots - a_{n, n-1} \boxed{x_{n-1}^{(k-1)}} \right] \quad (2.23)$$

ค่าตัวแปรในสมการ 3.7- 3.9 ตัวแปร  $x_1^{(k)}$   $x_1^{(k)}$  และ  $x_{n-1}^{(k-1)}$  จะแทนค่า  $x^{(k)}$  ที่หาได้จากขั้นตอนก่อนในรอบที่  $k$

เมื่อเปรียบเทียบวิธีแก้ปัญหาวัยวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์กับวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์-ไซเดล ตามตัวอย่างที่ 3.1 และตัวอย่างที่ 3.2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหของสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลจะมีการลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วกว่า

### 2.3.7 การหาคำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

เทคนิคของวิธีนิวตัน-ราฟสัน (newton-raphson method) จะใช้แก้ปัญหสมการไม่เชิงเส้นสามารถหาคำตอบได้ด้วยการประมาณค่าและการทำไอเทอเรนซ์ จากฟังก์ชัน  $x$  ใดๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลรวมของอนุกรมกำลัง (power series) ได้ โดยเฉพาะการเขียนด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (taylor's series) ได้ดังนี้

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n + \dots \quad (2.24)$$

อนุกรมเทย์เลอร์นี้จะลู่เข้าได้รวดเร็วสำหรับค่าของ  $x$  ที่ใกล้กับ  $a$  ในการประมาณค่าคำตอบโดยสมมติให้ลู่เข้าด้วยการใช้เพียงสองเทอมแรกของสมการที่ (2.24) ถ้าแทน  $a$  ด้วย  $x$  และแทน  $x$  ด้วย  $(x + \Delta x)$  อนุกรมนี้จะมีค่าเป็น

$$y = f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \dots \quad (2.25)$$

สมการที่ (2.25) จะใช้ได้สำหรับสมการที่ไม่ทราบค่าตัวแปร  $x$  เพียงตัวเดียว ในขณะที่ไม่ทราบค่าตัวแปรหลายตัว  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  ซึ่งแก้ปัญหโดยการประยุกต์ใช้หลักการของสมการที่ไม่ทราบค่าตัวแปรเพียงตัวเดียว ดังนี้

กำหนด

$$x^{(0)} = \text{ค่าประมาณที่ 1}$$

$$x^{(1)} = \text{ค่าประมาณที่ 2}$$

เมื่อ

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x \text{ แทนลงในสมการที่ (2.22) จะได้}$$

$$f(x^{(1)}) = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x^{(1)} - x^{(0)}) \quad (2.26)$$

ถ้า  $x^{(1)}$  เป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงคำตอบมากกว่า  $x^{(0)}$  สามารถที่จะสมมติให้เส้นโค้ง (curve) ของสมการตัดกับแกน  $x$  เมื่อ  $y^{(1)} = f(x^{(1)}) = 0$  ดังนั้น

$$0 = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x^{(1)} - x^{(0)}) \quad (2.27)$$

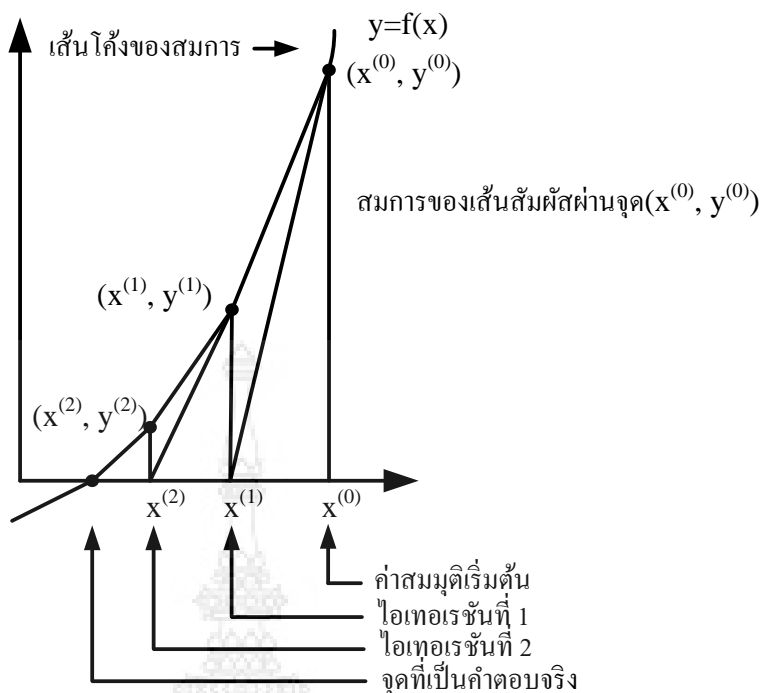
จากสมการที่ (2.27) สามารถหาค่าประมาณที่ 2 ในเทอมของค่าประมาณที่ 1 ได้ดังนี้

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปสำหรับการประมาณค่าที่  $(k+1)$  เพื่อหาคำตอบของสมการเดียวและตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียวได้ดังนี้

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})} \quad (2.29)$$

สมการที่ (2.29) อาจหาได้อีกวิธีหนึ่งนอกเหนือจากการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ วิธีนี้ทำได้โดยการสมมติให้มีเส้นสัมผัส (tangent line) กับเส้นโค้งของสมการที่จุดประมาณที่ 1  $(x^{(0)}, y^{(0)})$  ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 2.10 แนวความคิดสำหรับการหาสูตรประมาณค่าคำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากภาพที่ 3.2 เมื่อเส้นสัมผัสกับจุด  $(x^{(0)}, y^{(0)})$  มาตัดแกน  $x$  ที่จุด  $(x^{(1)}, y^{(1)} = 0)$  ก็จะได้คำตอบโดยประมาณใกล้เคียงมากกว่าค่าประมาณเริ่มต้นหรือค่าประมาณที่ 1 เมื่อเขียนสมการสำหรับเส้นสัมผัสหรือความชัน (slope) ที่  $(x^{(0)}, y^{(0)})$  จะได้

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

กำหนดให้  $y^{(1)} = 0$  ดังนั้น

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

จัดสมการเพื่อหาค่าประมาณค่าใหม่ คือ

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \quad (2.30)$$

จะเห็นได้ว่าแนวทางการหาสูตรค่าประมาณคำตอบของวิธีนิวตัน-ราฟสันด้วยวิธีการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์หรือวิธีลากเส้นสัมผัสเส้นโค้งของสมการก็จะได้สมการเดียวกัน และการประมาณค่าคำตอบให้ใกล้เคียงกับคำตอบจริงจะต้องดำเนินขั้นตอนไอเทอเรชันต่อไปจนกระทั่งลู่อเข้าหาคำตอบที่แท้จริง



$$\left. \begin{aligned} x_1^{(1)} &= x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \\ x_2^{(1)} &= x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \\ \dots\dots\dots \\ x_n^{(1)} &= x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

กระบวนการไอเทอเรชันของสมการที่ (2.33) จะถูกทำซ้ำจนกระทั่ง  $\Delta x$  มีค่าน้อยกว่าดัชนีกำหนดเพียงพอที่จะสอดคล้องกับคำตอบ เช่น กำหนดให้  $|\Delta x| \leq 0.001$  เป็นต้น และเพื่อความสะดวกสมการที่ (2.33) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1^{(0)} \\ y_2 - f_2^{(0)} \\ \dots\dots\dots \\ y_n - f_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์อนุพันธ์บางส่วนในบางครั้งจะเรียกว่า จาโคเบียนเมทริกซ์ (jacobian matrix) และในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าในอาร์เรย์ของ  $\Delta x$  จะต้องใช้เทคนิคการลดรูปแบบต่างๆ (matrix reduction) หรือกระบวนการอินเวอร์ส (matrix inversion) จาโคเบียนเมทริกซ์

**ตัวอย่างที่ 2.11** จงแก้ปัญหของสมการไม่เชิงเส้นต่อไปนี้ด้วยวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน

$$f_1(x_1, x_2) = x_1^2 - 4x_2 - 4 = 0$$

$$f_2(x_1, x_2) = 2x_1 - x_2 - 2 = 0$$

**วิธีทำ**

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $x_1^{(0)} = 1$  และ  $x_2^{(0)} = -1$  ดังนั้น

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) = 1 + 4 - 4 = 1$$

$$f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) = 2 + 1 - 2 = 1$$

2. อนุพันธ์บางส่วน คือ

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} &= 2x_1 = 2 \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} &= -4 \end{aligned} \right\} & \left. \begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= 2 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= -1 \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

3. จากสมการที่ (2.33) หาค่า  $\Delta x_1^{(0)}$  และ  $\Delta x_2^{(0)}$  ได้ คือ

$$y_1 - f_1^{(0)} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Delta x_2^{(0)} \quad (2.36)$$

$$y_2 - f_2^{(0)} = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Delta x_2^{(0)} \quad (2.37)$$

4. เมื่อแทนค่าตัวเลขลงใน (1) และ (2) จะได้

$$0 - 1 = 2\Delta x_1^{(0)} - 4\Delta x_2^{(0)} \quad (2.38)$$

$$0 - 1 = 2\Delta x_1^{(0)} - 1\Delta x_2^{(0)} \quad (2.39)$$

5. นำ (4) ลบออกจาก (3) จะได้

$$-3\Delta x_2^{(0)} = 0 \quad \text{และ} \quad \Delta x_2^{(0)} = 0$$

ดังนั้น

$$\Delta x_1^{(0)} = -0.5$$

6. การประมาณค่า  $x$  สำหรับการทำไอเทอเรชันต่อไป คือ

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} = 1 + (-0.5) = 0.5$$

$$x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} = -1 + 0 = -1$$

ต่อไปก็จะทำกระบวนการไอเทอเรชันซ้ำเดิมในขั้นตอนที่ 1 ใหม่ โดยใช้ค่า  $x_1^{(1)} = 0.5$  และ  $x_2^{(1)} = -1$  และจะได้คำตอบในไอเทอเรชันที่ 2 และไอเทอเรชันที่ 3 ดังนี้

$$x_1^{(2)} = 0.5357 \quad \text{และ} \quad x_2^{(2)} = -0.9286$$

$$x_1^{(3)} = 0.5359 \quad \text{และ} \quad x_2^{(3)} = -0.9282$$

### 2.3.8 ข้อดี-ข้อเสียการแก้ปัญหาโดยโหนดโพล์ด้วยวิธีของเกาส์ เกาส์-ไซเดล และนิวตัน-ราฟสัน

วิธีการแก้ปัญหาโหนดโพล์ด้วยวิธีของเกาส์ เกาส์-ไซเดล คล้ายกันมาก มีวิธีการคำนวณในแต่ละรอบไม่ยุ่งยากแต่จำนวนรอบของการคำนวณสูงกว่าจะได้ผลลัพธ์ออกมา วิธีของเกาส์-ไซเดลใช้จำนวนรอบของการคำนวณน้อยกว่าวิธีของเกาส์ ข้อเสียที่สำคัญอีกประการของวิธีของเกาส์ และเกาส์-ไซเดล ก็คือ จำนวนรอบของการคำนวณเพิ่มขึ้นตามจำนวนบัสของระบบ ส่วนวิธีของนิวตัน-ราฟสัน มีการคำนวณในแต่ละรอบยุ่งยากกว่าสองวิธีแรก แต่จำนวนของการคำนวณที่ใช้น้อย และไม่ขึ้นกับจำนวนบัสของระบบมากนัก

จำนวนรอบของการคำนวณของระบบที่มีจำนวนบัสต่างๆ กันไปของวิธีการแก้ปัญหาโหนดโพล์แบบเกาส์-ไซเดล และนิวตัน-ราฟสัน วิธีของเกาส์-ไซเดลแบบใช้ Ybus ดังที่ได้อธิบายมาตอนต้นใช้

จำนวนเวลาต่อหนึ่งรอบการคำนวณน้อยที่สุด ส่วนวิธีของนิวตัน- رافสัน ใช้จำนวนเวลาต่อหนึ่งรอบการคำนวณมาก และยิ่งระบบมีจำนวนบัสมากก็ทำให้จำนวนต่อหนึ่งรอบการคำนวณยิ่งมากตามด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 จำนวนรอบของการคำนวณแต่ละวิธี

จำนวนบัส	วิธีของเกาส์-ไซเดล (รอบ)	วิธีการของนิวตัน-رافสัน (รอบ)
14	24	4
30	33	4
57	59	4
92	80	4
114	92	4

### 2.3.9 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

#### 2.3.9.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์ (Gauss)

นิยามปัญหาการไหลของโหลด (definition of the load flow problem)

การศึกษาการไหลของโหลดจะเป็นการศึกษาระบบ 3 เฟสแบบสมดุลง และ การคำนวณเป็นระบบเฟสเดียว ผลของการศึกษาคือการหาตัวแปรทั้ง 4 ตัว ที่บัสแต่ละบัส  $k$  ใดๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ

1. กำลังที่บัสจริง (PK)
2. กำลังรีแอกทีฟที่บัส (Qk)
3. ขนาดแรงดันที่บัส (Vk)
4. มุมเฟสของแรงดันที่บัส ( $\delta_k$ )

ก่อนที่จะแก้ปัญหาก็ต้องทราบถึงตัวแปรที่แต่ละบัส 2 ค่าก่อนและหลังจากได้แก้ปัญห การไหลของโหลดจะมีผลทำให้ทราบค่าตัวแปร 2 ค่าที่เหลือ โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะกำหนดโนดหรือบัสไว้ 3 ชนิดดังนี้

1. บัสสวิง (swing bus or reference bus) บัสนี้เป็นบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะใช้ในการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดและกำลังสูญเสียของระบบ บัสสวิงจะกำหนดค่าแรงดัน ( $|V|$ ) และมุมเฟส ( $\delta_v$ )  $V \angle \delta_v = 1.0 p.u.$  โดยมีมุมแรงดันเท่ากับศูนย์ซึ่งถือว่าเป็นบัสอ้างอิงของระบบ

2. บัสแรงดันคงที่ (generator bus or voltage controlled bus) เป็นบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริงขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P) และขนาดแรงดันที่ผลิตได้ของบัส ( $|V|$ ) ส่วนค่า Q และ ( $\delta_v$ ) จะต้องคำนวณหา

3. บัสโหลด (load bus) เป็นบัสที่มีภาระไฟฟ้าต่ออยู่ บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริง (PL) และกำลังรีแอกทีฟ (QL) ซึ่งเป็นกำลังตามความต้องการของโหลด โดยต้องคำนวณหาขนาดแรงดัน ( $|V|$ ) และ

มุมเฟส  $\delta$  ของบัส สำหรับบัสที่ไม่มีทั้งโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสนี้จะพิจารณาเป็นบัสโหลดเช่นกัน

### 3.3.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel)

สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

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

หาแรงดันที่บัส  $i$  ด้วยวิธี Gauss-Seidel จากสมการ

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

( $k$  คือ เลขแสดงลำดับการคำนวณหาค่าตอบใหม่, ค่า  $k$  เริ่มต้นเท่ากับ 0)

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส  $i$  หาได้จาก

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

จะได้

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

เมื่อใช้วิธี Gauss-Seidel จะได้

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

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

เขียนสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟใหม่ได้เป็น

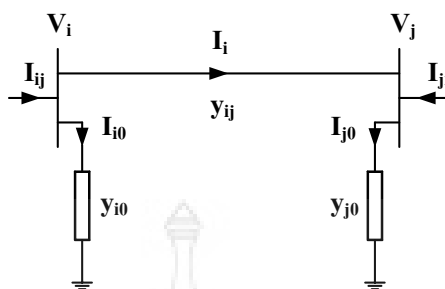
$$\text{ใหม่} \quad P_i^{(k+1)} = \text{Re} \left\{ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} Y_{ii} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq 1$$

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



### 2.3.10 การไหลของกำลังไฟฟ้า และกำลังสูญเสียในสาย (Power Flow and Power Loss)

จากวงจรระบบกำลังไฟฟ้ามีทิศทางต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 2.11 ทิศทางการไหลของกระแสในระบบไฟฟ้ากำลัง

#### 2.3.10.1 การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow)

จาก บัส i ไปยัง บัส j พบว่า

$$I_{ij} = I_1 + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i$$

และกำลังไฟฟ้าระหว่าง บัส i ไป บัส j คือ

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

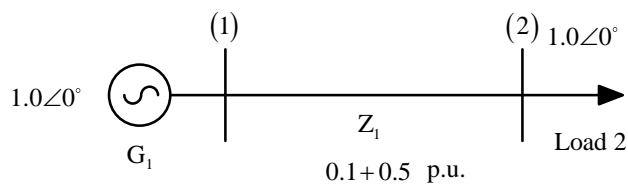
#### 2.3.10.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสาย (Power Loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งระหว่าง บัส i กับ บัส j มีค่าเท่ากับ

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

ตัวอย่างที่ 3.4 ระบบไฟฟ้าในภาพที่ 3.15 ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 เข้ากับโหลดที่บัส 2 ผ่านสายส่งซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์  $0.1 + j0.5$  p.u. โดยไม่มีแอดมิตแตนซ์ขนานในระบบ กำหนดให้บัส 1 เป็นบัสอ้างอิง (swing bus) โดยมีแรงดันคงที่ และที่บัส 2 ระบบจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) 0.3 p.u. และจ่ายค่า กำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ (Q) 0.2 p.u. จงหาแรงดันที่บัส 2 เมื่อมีการจ่ายโหลด

กำหนด : ค่า  $\epsilon = 0.005$



ภาพที่ 2.12 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส

หาค่าแอดมิตแตนซ์  $Y$  ระหว่างบัส (1) - (2) ได้จาก

$$\begin{aligned} Y_{\text{Line}} = Y_{12} = Y_{21} &= \frac{1}{Z_{\text{Line}}} \\ &= \frac{1}{0.1 + j0.5} \\ &= 0.3846 - j1.9231 \end{aligned}$$

กรณีมีบัสเชื่อมกัน 2 บัส หาเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์  $[Y]$  ได้จาก

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{10} + Y_{12} & -(Y_{12}) \\ -(Y_{21}) & Y_{20} + Y_{21} \end{bmatrix}$$

จากโจทย์ ไม่มีแอดมิตแตนซ์ขนานอยู่

$$\Rightarrow Y_{10} = Y_{20} = 0$$

จะได้

$$[Y] = \begin{bmatrix} 0 + Y_{12} & -(Y_{12}) \\ -(Y_{21}) & 0 + Y_{21} \end{bmatrix}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 0.3846 - j1.9231 & -0.3846 + j1.9231 \\ -0.3846 + j1.9231 & 0.3846 - j1.9231 \end{bmatrix}$$

บัส 1 > Swing Bus รู้  $V$  กับ  $\delta$  คือ

$$V = 1.0 \angle 0^\circ$$

บัส 2 > Load Bus รู้  $P$  กับ  $Q$  คือ

$$P_2 = -0.3 \text{ p.u.}, Q_2 = -0.2 \text{ p.u.}$$

จากโจทย์ที่บัส 2 ระบบจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริง ( $P$ ) 0.3 p.u. และจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกแตนซ์ ( $Q$ ) 0.2 p.u.

หาแรงดันที่บัส 2 ( $V_2$ ) โดยวิธี Gauss (แทน  $i = 2$ )

จาก

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

จะได้

$$V_2^{(k+1)} = \frac{\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^{*(k)}} - Y_{21} V_1}{Y_{22}}$$

แทนค่าต่างๆ ไปใน

$$V_2^{(k+1)} = \frac{\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^{*(k)}} - Y_{21} V_1}{Y_{22}}$$

โดยที่ :

$$P_2 = -0.3 \text{ p.u.}, Q_2 = -0.2 \text{ p.u.},$$

$$Y_{21} = -0.3846 + j1.9231, Y_{22} = 0.3846 - j1.9231, V_1 = 1.0 \angle 0^\circ$$

$$V_2^{(k+1)} = \frac{1}{0.3846 - j1.9231} \left( \frac{-0.3 + j0.2}{V_2^{*(k)}} - [(-0.3846 + j1.9231)(1.0 \angle 0^\circ)] \right)$$

$$V_2^{(k+1)} = \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{V_2^{*(k)}} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right)$$

การคำนวณรอบที่ 1 (Iteration #1) :

$$\begin{aligned} V_2^{(1)} &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{V_2^{*(0)}} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \\ &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{1.0 \angle 0^\circ} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \end{aligned}$$

$$= 0.8797 \angle -8.499$$

การคำนวณรอบที่ 2 (Iteration #2) :

$$\begin{aligned} V_2^{(2)} &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{V_2^{*(1)}} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \\ &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{(0.8797 \angle -8.499^\circ)} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \\ &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{(0.8797 \angle +8.499^\circ)} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \\ &= 0.8412 \angle -8.499^\circ \end{aligned}$$

การคำนวณรอบที่ 3 (Iteration #3) :

$$\begin{aligned} V_2^{(3)} &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{(0.8412 \angle -8.499^\circ)} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \\ &= 0.8345 \angle -8.962^\circ \end{aligned}$$

การคำนวณรอบที่ 4 (Iteration #4) :

$$\begin{aligned} V_2^{(4)} &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{(0.8345 \angle -8.962^\circ)} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \\ &= 0.8320 \angle -8.962^\circ \end{aligned}$$

การคำนวณรอบที่ 5 (Iteration #5) :

$$\begin{aligned} V_2^{(5)} &= \frac{1}{1.9612 \angle -78.8} \left( \frac{0.3603 \angle 146.3^\circ}{(0.8320 \angle -8.962^\circ)} - (1.9612 \angle 101.3^\circ) \right) \\ &= 0.8315 \angle -8.962^\circ \end{aligned}$$

$$|V_2^{(4)} - V_2^{(5)}| = |0.8320 - 0.8315| = 0.005 < 0.005$$

$$|\delta_2^{(4)} - \delta_2^{(5)}| = |-8.962 - (-8.962)| = 0 < 0.005$$

\*\*ความแตกต่างน้อยกว่า 0.005 > V2(5) คือ คำตอบ

แรงดันแต่ละบัสในระบบเป็น

$$V_1 = 1.0 \angle 0, V_2 = 0.8315 \angle -8.994$$

ตรวจสอบคำตอบ (V2) โดยหาจากกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ บัส 2

$$I_1 = \frac{(V_1 - V_2)}{Z_1} = \frac{1 \angle 0^\circ - 0.8315 \angle -8.994^\circ}{0.1 + j0.5}$$

$$= 0.4333 \angle -42.65^\circ$$

กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (S) ที่ระบบจ่ายเข้าไปที่บัส 2

$$S = VI^*$$

$$= (0.8315 \angle -8.994^\circ)(0.4333 \angle -42.65^\circ)$$

$$= (0.8315 \angle -8.994^\circ)(0.4333 \angle +42.65^\circ)$$

$$= 0.2999 + j0.1997$$

ใกล้เคียงกับโจทย์ คือ

$$0.3 + j0.2$$

### 2.3.10.3 สรุปการหาคำตอบด้วยวิธี Gauss-Seidel

#### 1. Swing Bus (Gen Bus)

- กำหนดค่าเริ่มต้นเป็น  $1.0 + j0.0$

#### 2. P-Q Bus (Load Bus)

- ทราบค่า  $P_i^{sch}$  และ  $Q_i^{sch}$

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

### 3. P-V Bus (Gen Bus)

- ทราบค่า  $P_i^{sch}$  และ  $|V_i|$
- หาค่า  $Q_i^{(k+1)}$  โดยใช้  $P_i^{sch}$  และ  $|V_i|$  ที่ทราบ
- ใช้ค่า  $Q_i^{(k+1)}$  ที่ได้ มาหาค่า  $V_i^{(k+1)}$  ต่อ
- แต่  $|V_i|$  คงที่ และค่า  $V_i^{(k+1)}$  เปลี่ยนเฉพาะ “ส่วนจินตภาพ”

4. การใช้ตัวเร่งเพื่อให้การ iteration ลู่เข้าหาค่าตอบเร็วขึ้น โดยทั่วไปใช้ตัวเร่ง  $\alpha$  ระหว่าง 1.3 ถึง 1.7 โดยที่

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

### 2.3.11 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson)

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

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

ถ้ากำหนดให้  $j$  เท่ากับ  $i$  จะได้สมการเป็น

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

สมมติค่าพารามิเตอร์ต่างๆในรูปเชิงขั้ว (polar form)

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \quad V_j = |V_j| \angle \delta_j \quad Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$$

จะได้

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

กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) หาได้ดังนี้

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

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

รูปแบบสมการเมทริกซ์สำหรับการวิเคราะห์ Newton-Raphson คือ

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

สำหรับบัสอ้างอิง (swing bus) จะไม่นำมาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากทราบค่า  $|V_i|$  และ  $\delta$  โดยกำหนดค่าให้เท่ากับ  $1 \angle 0^\circ$

หาเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์

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

จาก

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

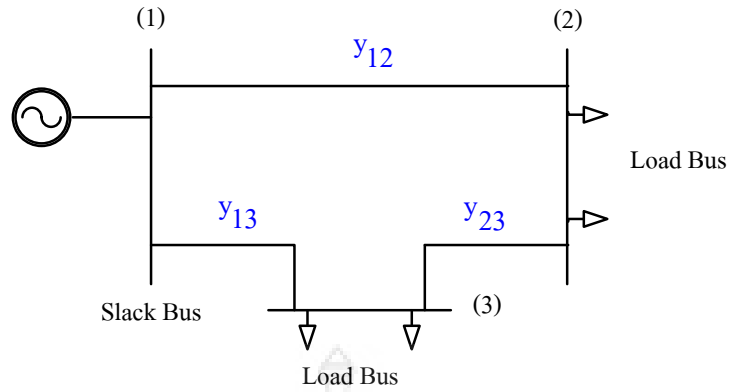
$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

หาสมาชิกแต่ละตัวในจาโคเบียนเมทริกซ์

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

\*จะไม่ใช้บัส 1 ในการหา  $[J]$  เนื่องจากเป็นบัสอ้างอิง

ตัวอย่างที่ 3.6 จงหาสมาชิกแต่ละตัวของจาโคเบียน  $[J]$  ของระบบไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ระบบไฟฟ้าจำนวน 3 บัสในการหาค่าจาโคเบียน

หา  $P_2$  และ  $P_3$  จากสูตร

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

$$\begin{aligned} P_2 &= |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2||V_2||Y_{22}| \cos(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) + \\ &\quad |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\ &= |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2|^2 |Y_{22}| \cos(\theta_{22}) + \\ &\quad |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_3 &= |V_3||V_1||Y_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |V_3||V_2||Y_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + \\ &\quad |V_3||V_3||Y_{33}| \cos(\theta_{33} + \delta_3 - \delta_3) \\ &= |V_3||V_1||Y_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |V_3||V_2||Y_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + \\ &\quad |V_3||V_3||Y_{33}| \cos(\theta_{33}) \end{aligned}$$

หา  $Q_2$  และ  $Q_3$  จากสูตร

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

$$\begin{aligned} Q_2 &= -|V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2||V_2||Y_{22}| \sin(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) \\ &\quad - |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\ &= -|V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2|^2 |Y_{22}| \sin(\theta_{22}) \\ &\quad - |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
Q_3 &= -|V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) - |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) \\
&\quad - |V_3||V_3||Y_{33}|\sin(\theta_{33} + \delta_3 - \delta_3) \\
&= -|V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) - |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) \\
&\quad - |V_3|^2|Y_{33}|\sin(\theta_{33})
\end{aligned}$$

หาสมาชิกแต่ละตัวในจาโคเบียน จาก

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta |V_2| \\ \Delta |V_3| \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} &= \frac{\partial}{\partial \delta_2} [ |V_2||V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2|^2|Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + \\
&\quad |V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) ] \\
&= |V_2||V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} &= \frac{\partial}{\partial \delta_3} [ |V_2||V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2|^2|Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + \\
&\quad |V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) ] \\
&= -|V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} &= \frac{\partial}{\partial |V_2|} [ |V_2||V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2|^2|Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + \\
&\quad |V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) ] \\
&= |V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + 2|V_2||Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + \\
&\quad |V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} &= \frac{\partial}{\partial |V_3|} [ |V_2||V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2|^2|Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + \\
&\quad |V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) ]
\end{aligned}$$

$$= |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{23}| \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}_3}{\partial \delta_2} &= \frac{\partial}{\partial \delta_2} [|\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + \\ &\quad |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{33}| \cos(\theta_{33})] \\ &= -|\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{32}| \sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}_3}{\partial \delta_3} &= \frac{\partial}{\partial \delta_3} [|\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + \\ &\quad |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{33}| \cos(\theta_{33})] \\ &= |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{31}| \sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{32}| \sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}_3}{\partial |\mathbf{V}_2|} &= \frac{\partial \mathbf{P}_3}{\partial |\mathbf{V}_2|} [|\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) \\ &\quad + |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{33}| \cos(\theta_{33})] \\ &= |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}_3}{\partial |\mathbf{V}_3|} &= \frac{\partial}{\partial |\mathbf{V}_3|} [|\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + \\ &\quad |\mathbf{V}_3| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{33}| \cos(\theta_{33})] \\ &= |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |\mathbf{V}_2| |\mathbf{Y}_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + 2|\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{33}| \cos(\theta_{33}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{Q}_2}{\partial \delta_2} &= \frac{\partial}{\partial \delta_2} [-|\mathbf{V}_2| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{21}| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |\mathbf{V}_2|^2 |\mathbf{Y}_{22}| \sin(\theta_{22}) - \\ &\quad |\mathbf{V}_2| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{23}| \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)] \\ &= |\mathbf{V}_2| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{21}| \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |\mathbf{V}_2| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{23}| \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{Q}_2}{\partial \delta_3} &= \frac{\partial \mathbf{Q}_2}{\partial \delta_3} [-|\mathbf{V}_2| |\mathbf{V}_1| |\mathbf{Y}_{21}| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |\mathbf{V}_2|^2 |\mathbf{Y}_{22}| \sin(\theta_{22}) - \\ &\quad |\mathbf{V}_2| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{23}| \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)] \\ &= -|\mathbf{V}_2| |\mathbf{V}_3| |\mathbf{Y}_{23}| \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} &= \frac{\partial}{\partial |V_2|} [-|V_2||V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2|^2|Y_{22}|\sin(\theta_{22}) - \\ &\quad |V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)] \\ &= -|V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - 2|V_2||Y_{22}|\sin(\theta_{22}) - \\ &\quad |V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} &= \frac{\partial}{\partial |V_3|} [-|V_2||V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2|^2|Y_{22}|\sin(\theta_{22}) - \\ &\quad |V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)] \\ &= -|V_2||Y_{23}|\sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} &= \frac{\partial}{\partial \delta_2} [-|V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) - |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) - \\ &\quad |V_3|^2|Y_{33}|\sin(\theta_{33})] \\ &= -|V_3||V_2||Y_{32}|\cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} &= \frac{\partial}{\partial \delta_3} [-|V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) - |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) - \\ &\quad |V_3|^2|Y_{33}|\sin(\theta_{33})] \\ &= -|V_3||V_1||Y_{31}|\cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} &= \frac{\partial}{\partial |V_2|} [-|V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) - |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) - \\ &\quad |V_3|^2|Y_{33}|\sin(\theta_{33})] \\ &= -|V_3||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} &= \frac{\partial}{\partial |V_3|} [-|V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) - |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) - \\ &\quad |V_3|^2|Y_{33}|\sin(\theta_{33})] \\ &= |V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) - |V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + \\ &\quad 2|V_3||Y_{33}|\sin(\theta_{33})\end{aligned}$$

ส่วน  $\Delta P_i^{(k)}$  และ  $\Delta Q_i^{(k)}$  คือผลต่างของค่าจริงที่บัสนั้น (scheduled) กับค่าที่ได้จากการคำนวณแต่ละรอบของการ iteration ผลต่างนี้มีชื่อเรียกว่า power residuals

$$\begin{aligned}\Delta P_i^{(k)} &= P_i^{\text{sch}} - P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} &= Q_i^{\text{sch}} - Q_i^{(k)}\end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}P_i^{(k)} &= \sum_{j=1}^n |V_i^{(k)} V_j^{(k)} Y_{ij}^{(k)}| \cos(\theta_{ij}^{(k)} + \delta_j^{(k)} - \delta_i^{(k)}) \\ Q_i^{(k)} &= \sum_{j=1}^n |V_i^{(k)} V_j^{(k)} Y_{ij}^{(k)}| \sin(\theta_{ij}^{(k)} + \delta_j^{(k)} - \delta_i^{(k)})\end{aligned}$$

จะ  $[J^{(k)}]$ ,  $\Delta P_i^{(k)}$  และ  $\Delta Q_i^{(k)}$  ดังนั้นหา

$$\Delta \delta_i^{(k)}, \Delta |V_i^{(k)}|$$

ได้

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

จะได้ขนาดแรงดันและมุมแรงดันที่บัสใหม่เป็น

$$\begin{aligned}\delta_i^{(k+1)} &= \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \\ |V_i^{(k+1)}| &= |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}|\end{aligned}$$

ทำการวนรอบต่อไปเรื่อยๆ จนค่าตอบอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้  $\leq \epsilon$

กรณีมีระบบ 3 บัส กำหนดให้ บัส 1 เป็นบัสอ้างอิง ส่วนบัส 2 และ 3 เป็นบัสโหลดสมาชิกแต่ละตัวในจาโคเบียนเมทริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta |V_2| \\ \Delta |V_3| \end{bmatrix}$$

## 2.4 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดโพล် วิธีนิวตัน-ราฟสัน

ที่บัสโหลด

ทราบค่า  $P_i^{sch}$  และ  $Q_i^{sch}$

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

หาค่า  $P_i^{(k)}, Q_i^{(k)}$  จาก

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

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

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

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

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)}$$

ที่บัสควบคุมแรงดัน

ทราบค่า  $P_i^{sch}$

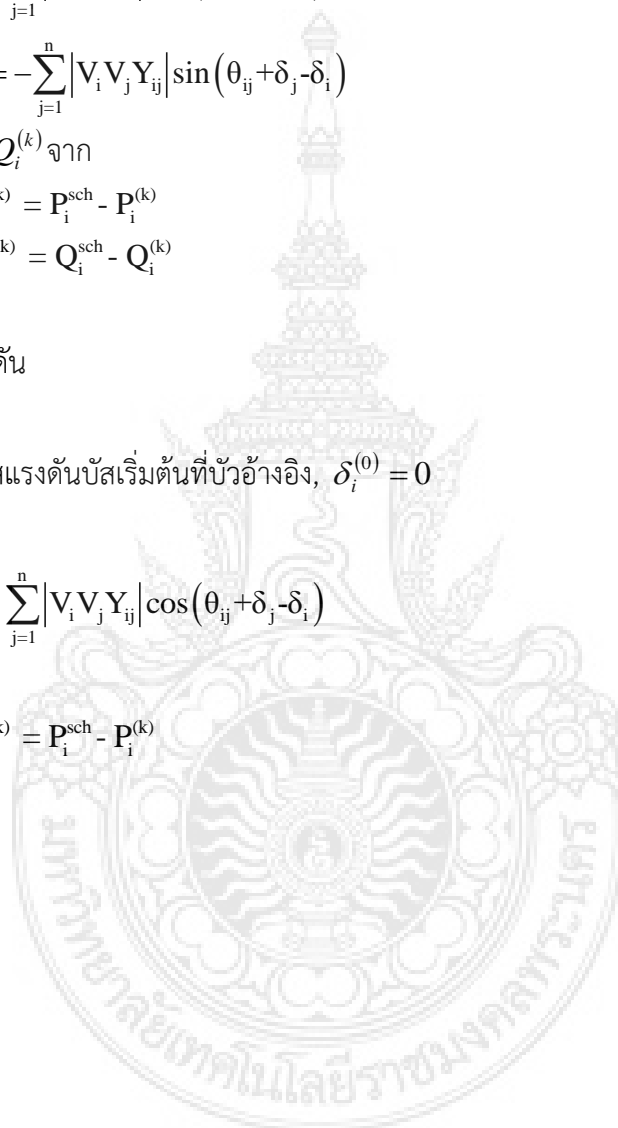
กำหนดค่ามุมเฟสแรงดันบัสเริ่มต้นที่บัสอ้างอิง,  $\delta_i^{(0)} = 0$

หาค่า  $P_i^{(k)}$  จาก

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

หาค่า  $\Delta P_i^{(k)}$  จาก

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



## บทที่ 3

### การออกแบบและการสร้างโครงการ

#### 3.1 บทนำ

การสร้างโครงการนี้ได้ทำการจำลองบัสทางไฟฟ้า 3 บัส คิดในสภาวะโหลด 3 เฟสสมดุล โดยสายส่งระหว่างบัสใช้แบบจำลองสายส่งระยะสั้นความยาว 60 กิโลเมตร ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ค่าแทนพารามิเตอร์ในสายส่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนาดเล็ก ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในส่วนของสแลคบัสได้ใช้วาริแอกแทนเพื่อทำการควบคุมแรงดัน และในส่วนของชุดโหลดได้ทำเป็นอุปกรณ์แยกต่างหาก โดยรายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวถึงต่อไป

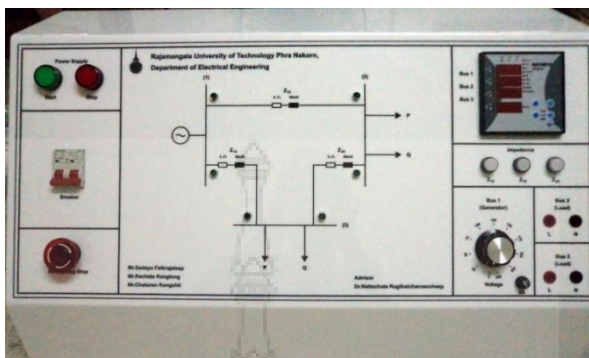
หลักการทำงานเบื้องต้นของโครงการนี้ คือ เมื่อมีการจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดทดลอง เพื่อศึกษาผลจากการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ เช่น ภาระทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันในระบบลดลง การศึกษากระแสและแรงดันเมื่อมีสับเปลี่ยนเส้นทางการไหลของไฟฟ้า เป็นต้น การออกแบบชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง มีส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์ ดังนี้

- ชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า
- วาริแอก
- อุปกรณ์แทนค่าความต้านทานของสายส่งไฟฟ้าระยะสั้น
- อุปกรณ์แทนค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้าระยะสั้น
- เพาเวอร์ มิเตอร์
- หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า
- ฟิวส์ตัดต่อวงจรของเพาเวอร์ มิเตอร์
- เบรกเกอร์ตัดต่อวงจรของระบบทั้งหมด
- หลอดไฟแสดงสถานะ เปิด-ปิด การจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่วงจร
- สวิตช์ปลดและสับสายส่งพร้อมไฟแสดงสถานะ
- สวิตช์ฉุกเฉิน

#### 3.2 โครงสร้างตู้ชุดทดลอง

โครงสร้างของตู้ชุดทดลองได้ทำการออกแบบเป็นลักษณะหน้าตู้สี่เหลี่ยม ด้านข้างเป็นทรงสามเหลี่ยมคางหมู โดยโครงสร้างด้านในเป็นตู้ชั้นเดียว อุปกรณ์ต่างๆส่วนใหญ่วางกับพื้นตู้ อาทิ ตัวต้านทานปรับค่าได้ ตัวเหนี่ยวนำ หม้อแปลงกระแส วาริแอก เป็นต้น

ในส่วนของชุดโหลด ได้ทำเป็นชุดโหลด RL โดยแยกเป็น 2 ชุด ตามจำนวนบัสโหนด ซึ่งในแต่ละชุดจะมีการเพิ่มโหนด 5 ระดับ เพื่อศึกษาระดับโหนดที่ต่าง ๆ กัน โหลด RL ที่ใช้ได้ใช้หลอดไส้ในการทดลอง โดยชุดที่สองได้มีการเพิ่มตัวเก็บประจุ เพื่อศึกษาการจ่ายตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบด้วย



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของชุดทดลอง



ภาพที่ 3.2 ชุดภาระทางไฟฟ้า

### 3.3 วาริแอก

เนื่องจากบัสสแลคเป็นบัสที่ต้องทำการควบคุมแรงดันอยู่เสมอ จึงได้ใช้วาริแอก(ตามรูปที่ 3.3) เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันแทน ซึ่งพิกัดของวาริแอกคือ 50 V, 2 A, 500 VA, 50 Hz



ภาพที่ 3.3 วาริแอก

### 3.4 อุปกรณ์แทนค่าความต้านทานของสายส่งไฟฟ้าระยะสั้น (Resistance)

ในการจำลองสายส่งระยะไกลจำเป็นต้องมีค่าความต้านทาน ของสายแต่ละชนิดแตกต่างกัน ออกไปอยู่ที่ขนาดสายและชนิดของสายซึ่งเป็นพื้นฐานเบื้องต้น จึงมีการจำลองค่าจากรางค่าความ ต้านทานของสายส่ง



ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์แทนค่าความต้านทานของสายส่ง

#### 3.4.1 การจำลองค่าความต้านทานวงจรเดียวของสายส่ง

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานขนาดและคุณสมบัติของสายไฟฟ้าอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)

ขนาดสาย MCM และ AWG	จำนวนเส้น อลูมิเนียม ต่อเหล็ก	เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอก ของ สายไฟฟ้า (นิ้ว)	GMR (ฟุต)	ความ ต้านทานที่ 50 °C (โอห์ม/ สาย/ไมล์)	Inductive Reactanc e ที่ระยะห่าง 1 ฟุต ( โอห์ม/ สาย/ไมล์)	Capacitiv e Reactanc e ที่ระยะห่าง 1 ฟุต (ล้านโอห์ม/ สาย/ไมล์)
1272	54/19	1.382	0.0465	0.084	0.31	0.1016
954	54/7	1.196	0.0403	0.1118	0.325	0.1068
795	54/7	1.093	0.0368	0.1358	0.3342	0.11
636	54/7	0.977	0.0329	0.1678	0.345	0.114
477	30/7	0.883	0.0304	0.196	0.3533	0.1176



- ความยาวสายส่ง 1.609 กิโลเมตร = 1 ไมล์
- ความยาวของสายส่ง 795 MCM ACSR = 37 ไมล์ (60 กิโลเมตร)
- พิกัดกระแสที่ 2 Amp. พิกัดแรงดัน 230 Volt / phase
- ความต้านทานของสายส่ง 0.1358 โอห์ม / ไมล์ X 37 ไมล์ = 5.0246 โอห์ม
- ทนพิกัดกำลังไฟฟ้า  $P = I^2 \times R$  ,  $2^2 \times 5 = 20 \text{ Watt}$  เลือกใช้ที่ 100 Watt

### 3.5 อุปกรณ์แทนค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้าระยะสั้น (Inductance)

เนื่องจากสายส่งไฟฟ้ามีคุณสมบัติที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้น ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับสายส่งจะมีกระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งไหลอยู่แม้ว่าจะยังไม่มีโหลดเลยก็ตาม กระแสไฟฟ้าที่ไหลนี้เป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าสลับที่เรียกว่าค่าความเหนี่ยวนำต่อระยะทางหนึ่งหน่วยซึ่งเกิดขึ้นจากผลของความถี่ที่จ่ายให้กับสายส่ง

ดังนั้นในการจำลองตู้ทดลองสายส่งระยะไกลจึงจำเป็นต้อง จำลองค่าความเหนี่ยวนำให้กับระบบตามความเหมาะสมจากการคำนวณต่างๆ



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์แทนค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้าระยะไกล

### 3.5.1 การจำลองค่าความเหนี่ยวนำในวงจรสายเดี่ยวของสายส่ง

ตารางที่ 3.2 ค่าความเหนี่ยวนำขนาดและคุณสมบัติของสายไฟฟ้าอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)

ขนาดสาย MCM และ AWG	จำนวนเส้น อลูมิเนียมต่อ เหล็ก	เส้นผ่าศูนย์กลาง กลางภายนอก ของ สายไฟฟ้า (นิ้ว)	GMR (ฟุต)	ความ ต้านทานที่ 50 °C (โอห์ม/สาย/ ไมล์)	Inductive Reactance ที่ระยะห่าง 1 ฟุต (โอห์ม/ สาย/ไมล์)	Capacitive Reactance ที่ระยะห่าง 1 ฟุต (ล้านโอห์ม/ สาย/ไมล์)
1272	54/19	1.382	0.0465	0.084	0.31	0.1016
954	54/7	1.196	0.0403	0.1118	0.325	0.1068
795	54/7	1.093	0.0368	0.1358	0.3342	0.11
636	54/7	0.977	0.0329	0.1678	0.345	0.114
477	30/7	0.883	0.0304	0.196	0.3533	0.1176

- ความยาวสายส่ง 1.609 กิโลเมตร = 1 ไมล์
- ความยาวของสายส่ง 795 MCM ACSR = 37 ไมล์ ( 60 กิโลเมตร )
- $D_s$  คือ Geometric Mean Radius หรือ GMR
- $D_m$  คือ Geometric Mean Distance หรือ GMD

จากสูตรจะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำ (L)

$$L = 0.7411 L_0 \log \frac{D_m}{D_s} \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

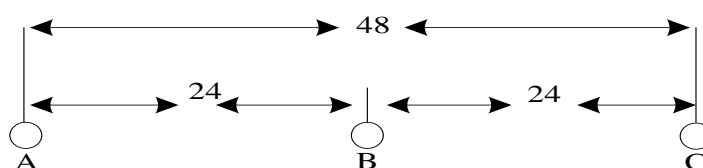
การหาค่า  $D_s$

$$D_s = GMR = 0.0368 \text{ ฟุต}$$

มาจากตารางขนาดและคุณสมบัติของสายไฟฟ้า อลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)

การหาค่า  $D_m$

$$D_m = \sqrt[3]{abxc} \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

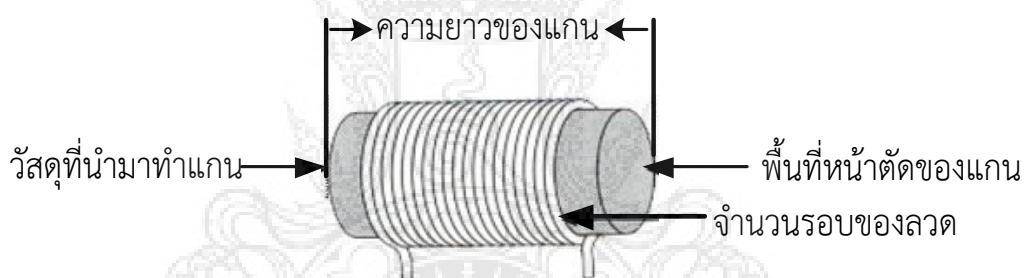


ภาพที่ 3.6 ระยะการวางสายส่งที่ความห่าง 24 ฟุตต่อเส้น

ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ

$$\begin{aligned}
 D_s &= 0.0368 \text{ ฟุต จากตาราง} \\
 D_m &= 3^3 \sqrt{24 \times 24 \times 48} \\
 &= 30.24 \text{ ฟุต} \\
 L &= 0.7411 L_0 g \frac{D_m}{D_s} \\
 L &= 0.7411 L_0 g \frac{30.24}{0.0368} \\
 &= 2.160 \text{ (มิลลิเฮนรี / เฟส / ไมล์)} \\
 L &= 2.160 \times 37 \\
 &= 80 \text{ มิลลิเฮนรี / เฟส}
 \end{aligned}$$

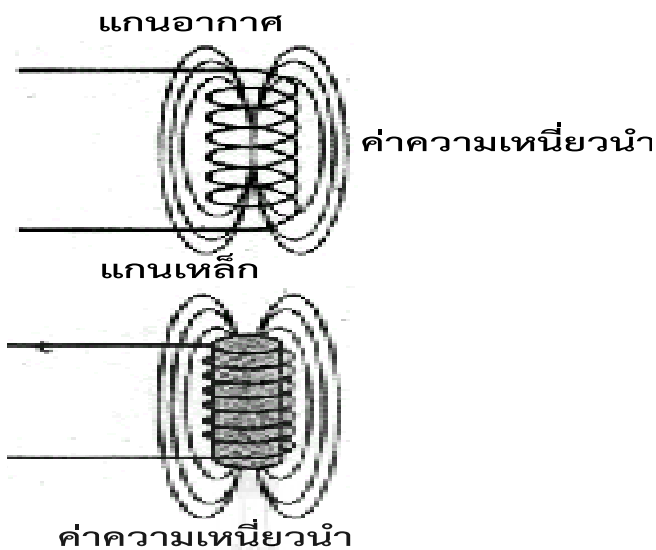
### 3.5.2 การจัดทำอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำมีค่าดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.7 การพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.3 ค่าความซึมซับได้ของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่าความซึมซับได้ $\mu$
อากาศหรือสุญญากาศ	$1.26 \times 10^{-5}$
นิกเกิล	$6.28 \times 10^{-5}$
คาบอลต์	$7.56 \times 10^{-5}$
เหล็กหล่อ	$1.1 \times 10^{-4}$
เหล็กแท่ง	$5.56 \times 10^{-4}$
แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	$6.9 \times 10^{-3}$
เหล็กซิลิกอน	$8.8 \times 10^{-3}$
เฟอร์มาลอย	0.126
ซูเปอร์มาลอย	1.26



ภาพที่ 3.8 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดลวด

จากปัจจัยทั้ง 4 ประการที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงสามารถนำมาเขียนเป็นสูตรคำนวณค่าความเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L = \frac{N^2 \times A \times \mu}{l} \dots\dots\dots (3.4)$$

- โดยที่
- L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)
  - N = จำนวนของขดลวด
  - A = พื้นที่ของขดลวด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m<sup>2</sup>)
  - μ = ค่าความซึมซับได้ (Permeability)
  - l = ความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดจึงหาได้ดังนี้จากค่า

- L = 80 mH
- A = 1.444 × 10<sup>-3</sup>
- U = 5.56 × 10<sup>-4</sup>
- l = 0.07 m

จะได้ว่า

$$N = \sqrt{\frac{Ll}{A\mu}} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$N = \sqrt{\frac{(80 \times 10^{-3}) \times (0.07)}{(1.444 \times 10^{-3}) \times (5.56 \times 10^{-4})}}$$

$$N = 83.5 \text{ rpm.}$$

### 3.6 เพาเวอร์ มิเตอร์

ในชุดทดลองวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้เพาเวอร์มิเตอร์เพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ในแต่ละบัส



ภาพที่ 3.9 เพาเวอร์มิเตอร์

### 3.7 หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า

ในระบบตู้จำลองสายส่งระยะไกลนี้จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงวัดกระแสให้กับ เพาเวอร์ มิเตอร์ เพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าและคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ของระบบต้นทางและปลายทางของตู้สายส่งระยะไกล



MSQ-40

ภาพที่ 3.10 หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า

### 3.8 ฟิวส์ตัดต่อวงจรของเพาเวอร์ มิเตอร์

ภายในตู้จำลองสายส่งใช้ฟิวส์ตัดต่อวงจรของ วารีแอกและเพาเวอร์มิเตอร์ เพื่อป้องกันการลัดวงจรหรือกระแสไฟฟ้าเกินพิกัดที่กำหนดเพื่อป้องกันความเสียหายของตัว วารีแอกและ เพาเวอร์มิเตอร์ พร้อมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน



ภาพที่ 3.11 ฟิวส์ตัดต่อวงจรของเพาเวอร์มิเตอร์

### 3.9 เบรกเกอร์ตัดต่อวงจรของระบบทั้งหมด

ตู้จำลองสายส่งนี้จำเป็นต้องใช้ เบรกเกอร์ เพื่อตัดต่อวงจรของตู้จำลองสายส่งระยะไกล เพื่อป้องกันการลัดวงจรหรือกระแสไฟฟ้าเกินพิกัดที่กำหนด และป้องกันความเสียหายของตัว อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้จำลองค่าต่างภายในตู้จำลองสายส่งระยะไกลนี้



ภาพที่ 3.12 เบรกเกอร์ตัดต่อวงจรไฟฟ้าของระบบ

### 3.10 หลอดไฟแสดงสถานะ เปิด-ปิด ระบบไฟฟ้า

ใช้แสดงสถานะในการหยุดหรือจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ตู้ทดลองสายส่งระยะไกล



ภาพที่ 3.13 หลอดไฟแสดงสถานะ เปิด-ปิด ระบบไฟฟ้าของตู้จำลองสายส่ง

### 3.11 สวิตช์ ปลดสับสายส่งและไฟแสดงสถานะ

ใช้ปลดสับสายส่งเพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อทำการปลดสับจะมีไฟแสดงสถานะในแต่ละเส้นทางสายส่งว่าทำการปลดสับแล้ว



ภาพที่ 3.14 สวิตช์ปลด-สับสายส่ง และไฟแสดงสถานะการณปลด-สับ

### 3.12 สวิตช์ฉุกฉิน

ใช้ตัดวงจรไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรเมื่อมีเหตุการณ์ฉุกฉินเพื่อป้องกันอุปกรณ์เสียหาย



ภาพที่ 3.15 สวิตช์ฉุกฉิน



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและการดำเนินงานของโครงการ เพื่อให้เป็นไปตามขอบเขตที่กำหนด โดยการทดสอบว่า ชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถ ทำการทดลองเพื่อดูค่าความเปลี่ยนแปลงของแรงดันต้น กระแส มุมเฟส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน และกำลังไฟฟ้าปรากฏของแต่ละบัส โดยจะทำการวิเคราะห์โดยใช้กรณีศึกษาตามใบงานที่กำหนด

ใบงานที่ทดสอบจะเป็นการทดสอบสภาวะของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งที่เป็นสภาวะปกติ และสภาวะฉุกเฉิน เพื่อศึกษาผลกระทบจากการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยทำการศึกษารายกรณีไป

#### 4.2 ผลการทดสอบการใช้งานชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

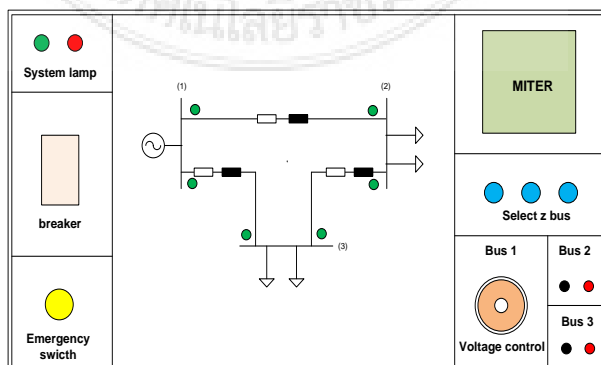
จากการทดสอบการทำงานโดยรวมการใช้งานของชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า สามารถทำงานตามขอบเขตที่กำหนดไว้ คือ ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 220 โวลต์ ที่กระแสสูงสุดที่ 2 แอมแปร์ เชื่อมต่อกับโหลด R และทดสอบได้ตามใบงานต่างๆที่กำหนดได้

#### 4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ลำดับขั้นตอนในการทดลอง

- 1.ปรับแรงดันที่สแลคบัสดำเนินการตามที่กำหนดไว้
- 2.ปรับพิกัดโหลด
- 3.จ่ายกระแสจากสแลคบัสไปยังบัสโหลด
- 4.บันทึกค่า P,Q,V และมุมของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสจากเพาเวอร์มิเตอร์
- 5.ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าแรงดันและโหลดตามใบงานที่กำหนด

ในการทดลองนั้น เมื่อป้อนไฟให้กับระบบ จากนั้นสับเบรกเกอร์ขึ้นแล้วจะมีไฟของระบบแสดงสัญญาณ โดยมีสวิตช์ฉุกเฉินสำหรับการป้องกันอุบัติเหตุในการทดลอง ในส่วนของโหลดนั้นจะมีจุดเชื่อมต่อสองจุดตามจำนวนบัสโหลดซึ่งจะเชื่อมต่อกับชุดโหลดภายนอกดังภาพที่ 4.1



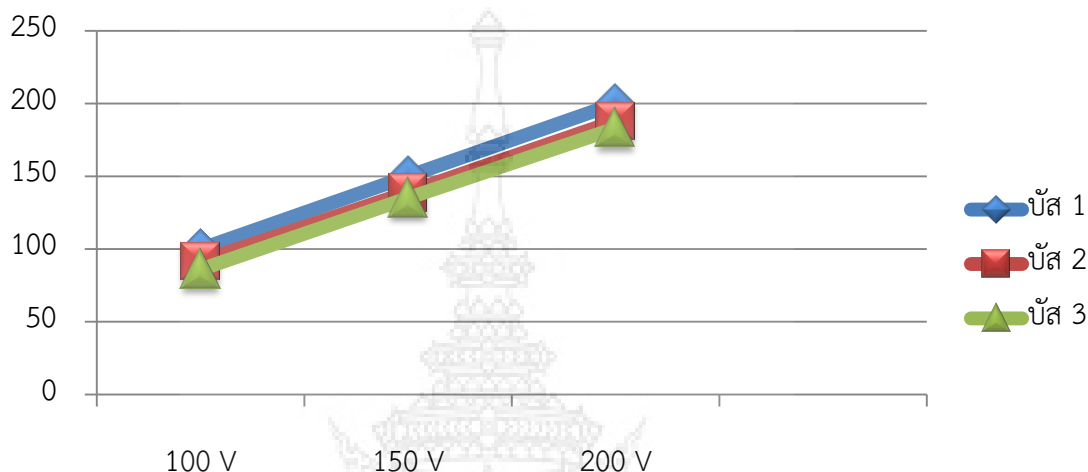
ภาพที่ 4.1 แพลนหน้าตู้



## 4.5 สรุปกรณีศึกษา

### 1. ผลจากการเพิ่มและลดแรงดันในวงจร

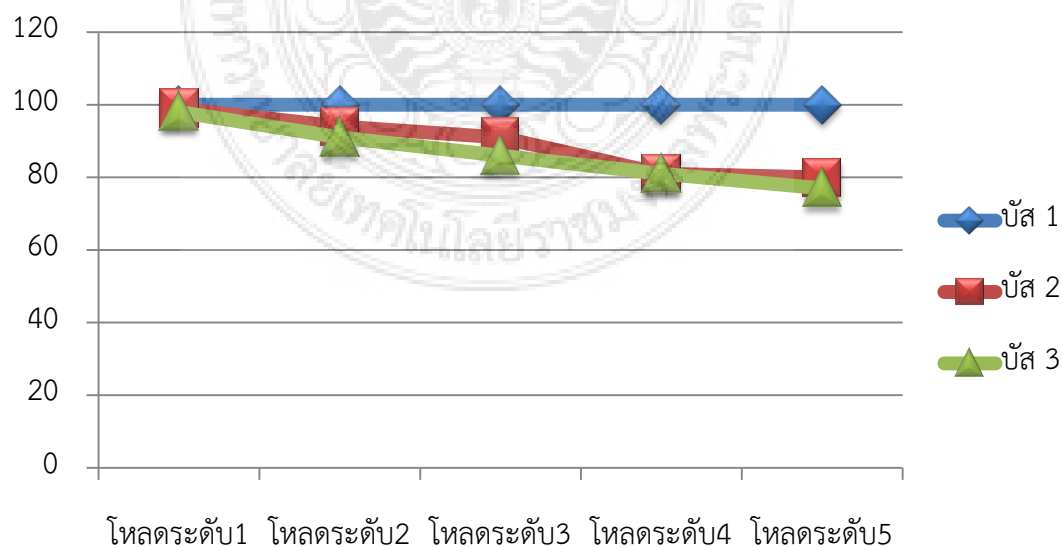
จากตารางผลการทดลองที่ 1 และ 2 เมื่อพิกัดโหลดที่เท่ากันหากป้อนแรงดันที่สูงขึ้นจะเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าในระบบ ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่บัสโหลดก็จะเพิ่มขึ้นตามแรงดัน ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันในระบบและแรงดันของบัส ( โหลดระดับ3)

### 2. ผลจากการเพิ่มและลดโหลดในวงจร

จากกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 เป็นการศึกษาลักษณะโหนดระดับ 1 – 5 ซึ่งจากการทดลองพบว่าระดับโหนดที่เพิ่มขึ้นในขณะที่รักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่ายไว้ แรงดันไฟฟ้าที่บัสโหนดนั้นจะลดลงตามโหนดที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.3

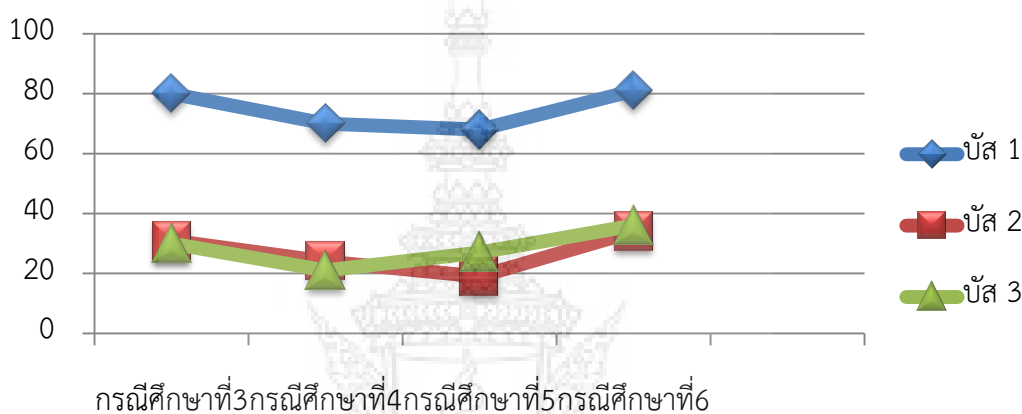


ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระดับโหนดกับแรงดันที่บัส (แรงดันระบบ 100 V )

### 3. ผลจากการปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของสายส่ง

จากกรณีศึกษาที่ 4, 5 และ 6 เป็นการศึกษาคกรณีเมื่อเกิดสภาวะฉุกเฉินเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นสภาวะปกติ โดยตัวอย่างที่พบเห็นได้จากกรณีศึกษานี้ อาทิเช่นสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งขาดไปหรือไม่สามารถจ่ายไฟให้กับระบบไปตามปกติได้ จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนเส้นทางสายส่งจากทางอื่นเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

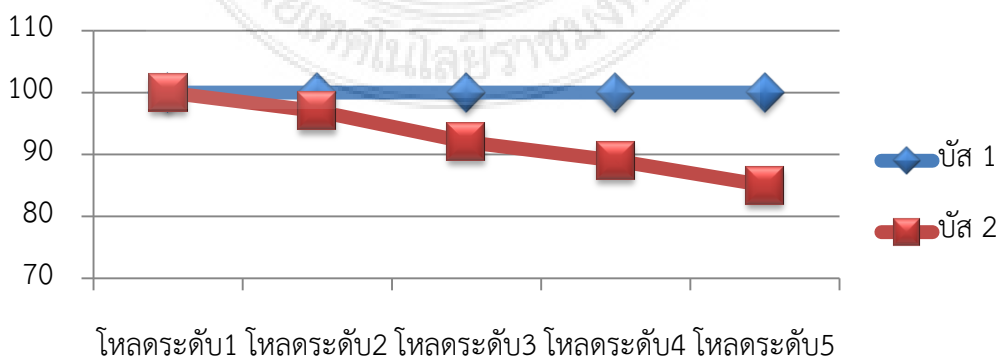
ผลจากการทดสอบพบว่าที่ภาระโหลดเท่ากันของกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี พบว่า ในการสับสายส่งแต่ละกรณีจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ต่าง ๆ กัน เนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ในสายส่งที่ไม่เท่ากัน ยิ่งอิมพีแดนซ์มากจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์กรณีศึกษากับกำลังไฟฟ้าปรากฏ (โหลดระดับ 3 )

### 4. ผลจากการเพิ่ม C เข้าไปในระบบ

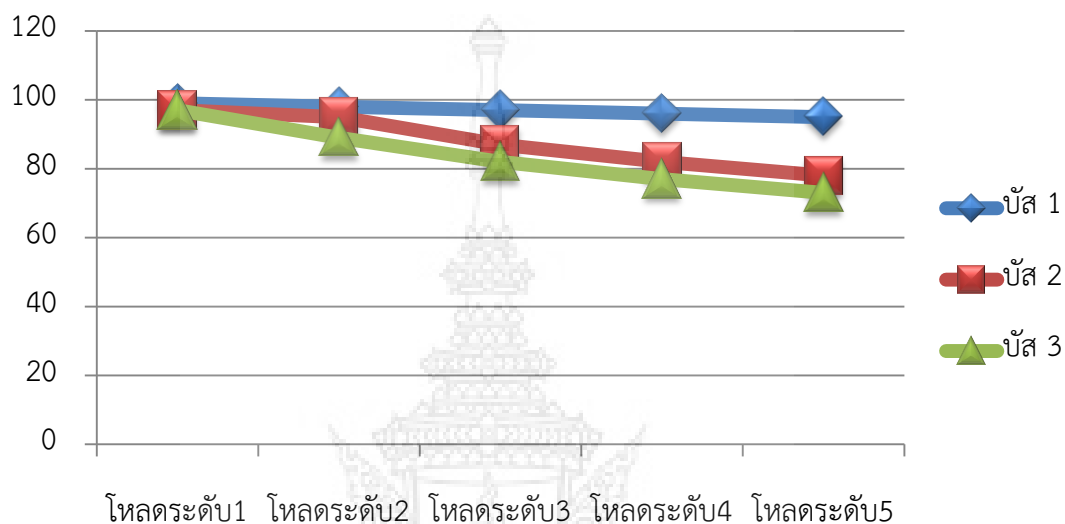
จากกรณีศึกษาที่ 8 เป็นการเพิ่ม C เข้าไปในระบบ 1.5 ไมโครฟารัด โดยศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 ผลจากการทดลองปรากฏว่าการเพิ่ม C เข้าไปในระบบจะช่วยให้แรงดันที่บัสโหลดจะช่วยเพิ่มแรงดันที่บัสโหลด แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอกทีฟก็เพิ่มขึ้นตาม ซึ่ง C ค่าๆหนึ่งนั้นจะช่วยรักษาแรงดันตามโหลดได้ระดับหนึ่งเท่านั้น หากโหลดมีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆก็เพิ่ม C เข้าไปมากขึ้นเพื่อรักษาแรงดันให้อยู่ในระดับเกณฑ์ที่กำหนดคือ 0.95-1.05 เพอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์โหลดกับแรงดัน

### 5. ผลจากการไม่ปรับแรงดันของบัสอ้างอิงไปตามโหลดที่เพิ่มขึ้น

จากกรณีศึกษาที่ 7 เป็นการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่ปรับแรงดันตามโหลดที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลปรากฏว่า ผลจากโหลดที่เพิ่มขึ้นทำให้โหลดมีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น เป็นผลทำให้แรงดันต้นทางที่จ่ายมาบัสอ้างอิงนั้นลดลง โดยเมื่อคิดเป็นระบบเปอร์เซ็นต์เมื่อเพิ่มโหลดระดับที่ 2 แรงดันไฟฟ้าที่บัสโหนดนั้นต่ำกว่ามาตรฐานคือต่ำกว่า 0.95 เปรอ์ยูนิต ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับแรงดัน (แรงดันที่ป้อน 100 V)

#### 4.4 ผลการทดลอง

กรณีศึกษาที่ 1 สับสายส่ง 1-2 บัส 2 เชื่อมต่อโหลด ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA
1	100	0.11	-0.94	11	4	11.7	99	0.10	-0.90	9.1	4.5	10	100	-	1	-	-	-
	150	0.15	-0.94	21.3	7.4	22.5	148	0.13	-0.91	18	8.1	19.5	150	-	1	-	-	-
	200	0.17	-0.94	33.6	11.5	34.8	197	0.15	-0.91	28.4	12.5	30.5	200	-	1	-	-	-
2	100	0.24	-0.98	24.5	5.2	24.7	95.4	0.22	-0.93	19.6	7.5	20.7	100	-	1	-	-	-
	150	0.31	-0.98	46.5	9.5	47	143	0.27	-0.94	38.1	13.2	40.2	150	-	1	-	-	-
	200	0.36	-0.98	72.1	14.9	73	191	0.32	-0.94	59.2	20.4	62.4	200	-	1	-	-	-
3	100	0.37	-0.99	37.8	3.7	37.7	91.6	0.33	-0.95	29.3	9.5	30.5	100	-	1	-	-	-
	150	0.47	-0.99	72	7.5	72.1	139	0.42	-0.96	57.5	16.9	59.8	150	-	1	-	-	-
	200	0.56	-0.99	113	43.1	113	188	0.50	-0.96	92.2	25.9	95	200	-	1	-	-	-
4	100	0.5	-0.99	50.5	0.6	50.5	87.5	0.45	-0.96	38.3	10.7	39.3	100	-	1	-	-	-
	150	0.63	-0.99	95.4	3.1	95.4	135	0.56	-0.97	75.1	19.5	77.8	150	-	1	-	-	-
	200	0.75	-0.99	151	8.2	151	185	0.68	-0.97	122	30	126	200	-	1	-	-	-
5	100	0.63	-0.99	63.7	4.5	63.5	83.8	0.57	-0.97	46.9	11.8	48	100	-	1	-	-	-
	150	0.81	-0.99	122	3.2	121	133	0.73	-0.97	95.8	21.8	97.3	150	-	1	-	-	-
	200	0.96	-0.99	193	0.2	193	18.2	0.87	-0.98	156	33.1	159	200	-	1	-	-	-

กรณีศึกษาที่ 2 สับสายส่ง 1-3 บัส 3 เชื่อมต่อโหลด ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA
1	100	0.12	-0.95	11.5	3.8	12.1	100	-	1	-	-	-	97.8	0.11	-0.95	10.8	3.4	11.2
	150	0.15	-0.95	22	7.2	23	150	-	1	-	-	-	147	0.14	-0.95	20.3	6.6	21.1
	200	0.17	-0.94	33.7	11.3	35	200	-	1	-	-	-	195	0.16	-0.95	30.7	10.4	32
2	100	0.25	-0.98	25	4	25	100	-	1	-	-	-	90.7	0.23	-0.96	20.8	5.9	21.3
	150	0.31	-0.98	46.9	7.8	47.2	150	-	1	-	-	-	139	0.29	-0.96	39.8	10.6	41
	200	0.36	-0.99	72.1	12.6	72.2	200	-	1	-	-	-	185	0.34	-0.97	62	16.4	63.6
3	100	0.37	-0.99	37.3	1.4	37.4	100	-	1	-	-	-	85.3	0.34	-0.98	29	7.1	29.7
	150	0.47	-0.99	73	0.46	73.4	150	-	1	-	-	-	135	0.44	-0.97	59.5	13.8	60.9
	200	0.56	-0.99	112	9.5	112	200	-	1	-	-	-	183	0.92	-0.97	93.4	21	99.5
4	100	0.49	-0.99	49.9	2.5	49.6	100	-	1	-	-	-	81.3	0.46	-0.98	37	8.3	37.3
	150	0.63	-0.99	96.3	0.5	96	150	-	1	-	-	-	131	0.59	-0.98	76.3	15.7	77.7
	200	0.75	-0.99	150	4	191	200	-	1	-	-	-	179	0.70	-0.98	123	24.4	126
5	100	0.69	-0.99	60.5	7	61.5	100	-	1	-	-	-	77.5	0.57	-0.98	43.5	8.9	44.4
	150	0.79	-0.99	119	7	119	150	-	1	-	-	-	127	0.73	-0.98	92.9	17.2	94
	200	0.94	-0.99	188	3.9	18	200	-	1	-	-	-	177	0.87	-0.98	193	26.7	154

กรณีศึกษาที่ 3 สับสายส่ง 1-2, 2-3 บัส 3 เชื่อมต่อโหลด ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 3

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA
1	100	2.25	-0.98	25.3	4.4	25.3	94.9	0.10	-0.91	8.8	4.1	3.6	93.1	0.15	-0.96	10	4.2	10.3
	150	0.31	-0.98	47	8.2	47.2	143	0.12	-0.91	16.9	7.7	18.2	141	0.14	-0.95	18.8	6.2	19.6
	200	0.37	-0.98	72.9	12.7	73.6	192	0.15	-0.91	26.7	12	28.9	188	0.16	-0.95	29.5	9.4	30.7
2	100	0.49	-0.99	49.8	2.5	49.7	86.2	0.21	-0.93	17	6.5	18	80.4	0.22	-0.96	17	4.9	17.5
	150	0.64	-0.99	97.8	2.5	97.5	134	0.28	-0.94	36.3	12.6	38	127	0.27	-0.96	34.5	9.5	35.2
	200	0.74	-0.99	149	6.7	149	183	0.32	-0.94	55.8	19.2	58.5	174	0.32	-0.96	55.8	15	57.4
3	100	0.71	-0.99	70.5	15.1	71.7	79.1	0.31	-0.95	23.6	7.7	24.5	69.5	0.31	-0.97	21.3	5.5	21.7
	150	0.94	-0.99	140	21.3	142	128	0.42	-0.96	52	15.2	54.2	117	0.4	-0.97	46.7	11.2	47.2
	200	1.11	-0.99	221	23.5	223	177	0.48	-0.96	83.9	23.8	87.5	164	0.49	-0.97	79.2	18.2	81.1
4	100	0.92	-0.99	87.8	29.8	92.3	74	0.41	-0.96	29.8	8.5	30.6	62.7	0.4	-0.97	24	5.5	24.4
	150	1.22	-0.99	178	43.6	185	123	0.55	-0.97	66.5	17.3	68.8	108	0.53	-0.99	56.8	13.2	58
	200	1.47	-0.99	288	51	295	173	0.65	-0.97	110	27.1	113	157	0.64	-0.98	100	20.2	102
5	100	1.11	-0.99	102	45.4	112	69.2	0.52	-0.97	35.6	9	36.5	53	0.48	-0.98	25	5.3	26.5
	150	1.50	-0.99	215	66.3	226	119	0.69	-0.97	81	18.7	83	101	0.65	-0.98	65.4	12.7	86.2
	200	1.83	-0.99	355	81.9	365	169	0.84	-0.98	139	29.7	141	151	0.80	-0.99	118	21.7	119

กรณีศึกษาที่ 4 สับสายส่ง 1-3, 3-2 บัส 2 เชื่อมต่อโหลด ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 4

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA
1	100	0.25	-0.99	21.1	3.7	25.2	89.7	0.11	-0.99	10	3.7	10.5	91.2	0.13	-0.98	12	3.5	12.2
	150	0.32	-0.99	48.2	6.9	48.2	136	0.15	-0.94	19.8	7.2	20.7	139	0.16	-0.97	23.1	4.9	23.2
	200	0.38	-0.99	77	10.9	77.6	183	0.19	-0.94	34	11.6	35.5	186	0.19	-0.98	35.9	7.6	36.6
2	100	0.48	-0.99	48	4.3	48.4	74.5	0.22	-0.99	16	5.2	16.9	80.2	0.26	-0.98	20.4	4	20.6
	150	0.62	-0.99	93	5	93.5	120	0.29	-0.96	34	10	35.2	128	0.33	-0.98	41.7	7.5	42.2
	200	0.75	-0.99	151	3.7	152	216.8	0.37	-0.96	60.7	16.7	62.8	17.7	0.39	-0.98	68.2	12.7	69.2
3	100	0.69	-0.97	67.1	16.8	68.4	63.2	0.32	-0.96	19.5	5.4	19.8	72.8	0.37	-0.98	27.1	4.6	27
	150	0.91	-0.99	136	23.6	139	111	0.42	-0.97	46.5	12	47.7	123	0.49	-0.99	59.8	9.8	60.2
	200	1.11	-0.99	221	27.6	223	158	0.54	-0.97	83.8	20	85.5	171	0.58	-0.98	99.2	15.8	100
4	100	0.88	-0.93	82.9	31	89	53.8	0.41	-0.97	21.5	5.4	22	67.3	0.49	-0.99	32.7	5	32.8
	150	1.2	-0.99	173	45	181	103	0.56	-0.98	56.3	13	57.7	118	0.64	-0.99	75.8	11.3	67.5
	200	1.47	-0.99	289	53.5	296	152	0.71	-0.97	106	22.5	108	168	0.73	-0.99	129	18.7	130
5	100	1.25	-0.91	121.8	44.1	104	46.4	0.48	-0.97	37	5	22.2	62.8	0.59	-0.97	44	5.6	37.2
	150	1.47	-0.99	210	65.7	222	97.7	0.68	-0.98	66.9	13.6	67	115	0.8	-0.99	92	12.7	92.7
	200	1.83	-0.99	383	80.8	368	148	0.87	-0.98	127	24.2	130	166	0.97	-0.99	160	21.1	161

กรณีศึกษาที่ 5 สับสายส่ง 1-2, 1-3 บัส 2, 3 เชื่อมต่อโหลด (รักษาระดับแรงดันที่บัส 1) ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 5

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA
1	100	0.27	-0.97	26.7	6.8	27.4	99.1	0.11	-0.92	10.7	4.7	11.5	98.7	0.11	-0.95	10.8	3.4	11.3
	150	0.33	-0.97	49.6	12.5	50.7	148	0.14	-0.97	20.2	8.7	21.7	147	0.14	-0.95	20.3	6.5	20.7
	200	0.37	-0.97	73.8	18.1	76	198	0.15	-0.99	28.5	12.5	30.7	196	0.17	-0.95	32	10	32.2
2	100	0.54	-0.99	54.5	6	54.6	94.7	0.23	-0.94	21.1	7.6	22.2	91.8	0.23	-0.96	20.9	5.7	21.5
	150	0.67	-0.99	100	11.2	100	142	0.29	-0.94	39.7	14	41.8	139	0.29	-0.96	39.9	10.7	40.4
	200	0.79	-0.99	158	17.3	157	191	0.34	-0.95	63.1	20.6	65.8	187	0.34	-0.97	62.8	16.2	64.4
3	100	0.80	-0.99	85	0.4	80.7	91.2	0.35	-0.95	30.8	9.5	31.7	86.4	0.35	-0.97	29.5	7	30
	150	1	-0.99	151	2.6	151	138	0.44	-0.96	59.1	17.4	61.4	133	0.44	-0.97	57.7	13.6	59.1
	200	1.18	1	236	6.3	236	188	0.52	-0.96	94.8	25.8	97.8	183	0.52	-0.97	93	20.7	94.8
4	100	1.04	-0.99	104	9.4	105	81.1	0.45	-0.96	38.5	10.6	39.7	81.4	0.46	-0.97	36.9	8.3	37.6
	150	1.32	-0.99	198	10.4	199	135	0.58	-0.97	77	19.6	79.2	129	0.58	-0.98	75	15.6	76
	200	1.57	-0.99	314	7.2	315	184	0.69	-0.97	126	29.6	129	187	0.69	-0.98	123	23.9	124
5	100	1.28	-0.98	126	20.7	128	83.4	0.57	-0.97	46.3	11.5	47.2	77.5	0.57	-0.98	43.5	8.9	44
	150	1.65	-0.99	246	25	248	132	0.73	-0.97	95.6	21.8	27.5	126	0.73	-0.98	91.8	17.2	93.6
	200	1.96	-0.99	392	24	394	182	0.87	-0.97	156	31.1	160	177	0.87	-0.98	153	26.7	154



กรณีศึกษาที่ 6 สับสายส่งเชื่อมกันครบทุกบัส บัส 2, 3 เชื่อมต่อโหลด ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 6

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA	V	A	$\cos \phi$	W	VAR	VA
1	100	0.27	-0.97	27	7	27.7	78.5	0.14	-0.94	13	7.6	13.7	98.9	0.13	-0.98	13.2	2.8	13.5
	150	0.34	-0.97	50.5	12.7	52	147	0.17	-0.94	24	8.6	25.2	147	0.17	-0.98	24.5	5.3	25.2
	200	0.4	-0.97	79.1	19.2	91	197	0.2	-0.95	38.4	13	39.8	197	0.4	-0.97	39	8.1	39.2
2	100	0.54	-0.99	54.8	5.7	54.7	92.5	0.26	-0.96	24	7	24.7	92.2	0.27	-0.98	25.5	4.8	25.6
	150	0.68	-0.99	102	11	102	141	0.33	-0.96	45.3	13.3	47	140	0.34	-0.98	14.8	8.8	48.7
	200	0.79	-0.99	158	17.5	158	190	0.39	-0.96	72.5	19.4	74.5	198	0.4	-0.98	75.7	13.3	76.2
3	100	0.81	-0.99	81.7	1	81.8	88.5	0.39	-0.97	33.7	9	34.7	88	0.41	-0.98	35.9	6.2	36.3
	150	1.01	-0.99	150	2.1	150	136	0.43	-0.97	64.5	16.2	66.4	135	0.51	-0.98	68.3	11.5	69
	200	1.19	-0.99	240	6.5	240	186	0.58	-0.97	107	24.7	109	186	0.6	-0.99	112	17.7	113
4	100	1.06	-0.99	105	10.8	106	84.2	0.5	-0.97	41.8	10	43	83.5	0.54	-0.99	49.6	7	45.2
	150	1.33	-0.99	201	11.6	201	132	0.64	-0.97	84	19	85.6	132	0.69	-0.98	89.5	13.6	89.7
	200	1.58	-0.98	317	8	318	182	6.77	-0.99	139	28.3	142	183	0.8	-0.99	145	21.1	146
5	100	1.31	-0.99	129	22.1	131	80.7	0.63	-0.97	50	11	50.6	79.9	0.66	-0.97	53.2	7.8	93
	150	1.67	-0.99	250	26.5	252	130	0.8	-0.99	103	20.7	105	129	0.84	-0.99	105	15.3	109
	200	1.97	-0.99	393	25	394	180	0.97	-0.98	171	31.7	174	179	1	-0.99	177	23.7	179

กรณีศึกษาที่ 7 สับสายส่ง 1-2, 1-3 บัส 2, 3 เชื่อมต่อโหลด (ไม่ทำการรักษาระดับแรงดันที่บัส 1) ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 7

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA
1	99	0.27	-0.96	26.5	7	27.2	97.1	0.13	-0.94	12.8	4.7	13.2	97	0.13	-0.98	13	2.8	13.2
	148	0.32	-0.96	46.5	12.2	47.7	148	0.15	-0.96	21.3	8	22.2	145	0.17	-0.94	24.2	5.5	24.7
	199	0.37	-0.97	73.5	17.9	75.2	197	0.17	-0.94	33.3	12	34.7	195	0.19	-0.98	38.7	7.8	38.6
2	98.2	0.53	-0.99	52.9	5.5	52.7	99	0.26	-0.96	23.5	7	24.2	89.1	0.27	-0.98	24	4.4	24.2
	147	0.65	-0.99	96.6	11	96.6	140	0.31	-0.96	43	12.5	44.2	136	0.34	-0.98	45.7	8.3	46.2
	198	0.77	-0.99	152	17.7	152	190	0.36	-0.96	67.3	19.3	69.3	185	0.33	-0.96	73.3	13.2	74.2
3	97.5	0.74	-0.99	77.4	0.8	77.4	87	0.38	-0.97	33.8	8.7	84	82.5	0.39	-0.99	32.5	5.7	33
	146	0.97	-0.99	143	2	143	135	0.47	-0.97	62.7	15.2	64.1	130	0.50	-0.98	65	10.7	65.6
	197	1.16	-0.99	229	6.8	229	185	0.55	-0.97	102	29	103	180	0.59	-0.99	106	17.2	107
4	96.61	1.03	-0.99	99.2	10.5	100	82.5	0.50	-0.97	41	9.7	4.7	77.2	0.52	-0.99	39.9	6.3	41.2
	146	1.3	-0.99	189	10.9	190	131	0.63	-0.97	81.5	17.9	83	125	0.66	-0.99	83	12.5	83.5
	197	1.55	-0.99	304	17.8	305	181	0.75	-0.98	133	27.6	136	175	0.73	-0.99	137	20.2	139
5	95.1	1.27	-0.98	119	21.3	112	78.8	0.62	-0.99	48.7	10.2	49.7	73	0.64	-0.99	46.7	6.8	48.8
	145	1.62	-0.99	233	25.9	235	127	0.8	-0.98	99.9	19.5	101	121	0.82	-0.99	95.6	13.8	99.1
	196	1.95	-0.99	380	25.4	381	177	0.95	-0.98	168	31	169	172	0.98	-0.99	768	22.3	109

กรณีศึกษาที่ 8 สับสายส่ง 1-2 บัส 2 เชื่อมต่อโหลดพร้อมทั้ง Inject  $1.5 \mu F$  ดังตารางที่ 4.8  
 ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

ระดับ โหลด	BUS 1						BUS 2						BUS 3					
	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA	V	A	cos $\phi$	W	VAR	VA
1	100	0.15	-0.76	11.9	10	15.5	100	0.15	-0.74	11.5	10.5	15.5	-	-	-	-	-	-
	150	0.2	-0.73	21.8	50.5	29.7	150	0.2	-0.69	20.5	21.9	21.6	-	-	-	-	-	-
	200	0.29	-0.69	33.8	35	49	201	0.24	-0.66	31.9	36.5	48.7	-	-	-	-	-	-
2	100	0.28	-0.93	26.4	10.5	28.2	97	0.27	-0.88	23.6	13.2	26.7	-	-	-	-	-	-
	150	0.35	-0.91	48.9	22.2	53.5	147	0.35	-0.86	44.7	26.7	51.8	-	-	-	-	-	-
	200	0.42	-0.89	76	38.4	84.7	197	0.41	-0.84	69.6	44.6	82.5	-	-	-	-	-	-
3	100	0.41	-0.98	40.4	8	41	92.3	0.4	-0.91	34.5	14.7	37.5	-	-	-	-	-	-
	150	0.51	-0.97	75.6	19.5	77.7	142	0.51	-0.91	66.8	30	73	-	-	-	-	-	-
	200	0.61	-0.95	119	35.8	124	193	0.61	-0.91	108	50	118	-	-	-	-	-	-
4	100	0.53	-0.99	54	3.7	59	89.2	0.53	-0.94	45.2	15.7	47.3	-	-	-	-	-	-
	150	0.68	-0.99	101	137	102	138	0.67	-0.94	88.5	13.6	94	-	-	-	-	-	-
	200	0.80	-0.98	159	25	161	189	0.79	-0.93	141	52.8	150	-	-	-	-	-	-
5	100	0.65	-0.99	66	1.2	66.3	85.4	0.65	-0.96	53.2	16.5	55.8	-	-	-	-	-	-
	150	0.87	-0.99	126	7	126	136	0.83	-0.95	108	33.7	112	-	-	-	-	-	-
	200	1	-0.99	199	20.9	201	186	0.99	-0.95	176	55.9	184	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.9 แรงดันตกคร่อมในความต้านทาน R, L และโหลด

ระดับ โหลด	$Z_{12}$				$Z_{13}$			$Z_{13}, Z_{23}$				
	$V_s$	$VR_1$	$VL_1$	v โหลด 1	$VR_2$	$VL_2$	v โหลด 2	$VR_1$	$VR_3$	$VL_1$	$VL_3$	v โหลด 3
1	100	0.4	5.2	100.5	0.3	4.9	97.6	0.3	0.3	3.8	3.9	96
	150	0.5	8.1	150.6	2	7.1	146	0.4	0.4	5.3	5.6	144.3
	200	1.5	10.8	201.5	0.5	93	194.4	0.5	0.5	6.9	7.2	192.8
2	100	0.8	12.6	100	0.7	15.8	90.2	0.7	0.7	11.3	11.5	86.5
	150	1	16.8	145.5	0.9	20.5	136.3	0.9	0.9	15.3	15.5	138.8
	200	1.3	20.7	198.3	1.1	24	184.2	1.2	1.1	18.4	18.6	178.6
3	100	1.2	20.3	90.5	1.1	24.8	82.8	1.1	1.1	18.4	18.5	76.3
	150	1.6	24.8	141	1.5	29.7	129.7	1.4	1.4	23.4	23.5	120.7
	200	1.8	28.5	190.5	2.9	33.2	178.6	1.6	1.7	27.2	27.3	167.2
4	100	1.6	26.4	86.9	1.5	31	77.8	1.4	1.4	23.8	23.9	67
	150	2.3	31.2	135.8	1.5	36	125.3	1.9	1.9	29.3	29.6	111.4
	200	1.9	34.7	186.5	2.4	39.3	173.5	2.2	2.2	33.7	33.9	158
5	100	2	31.3	82.8	1.9	35.6	73.7	1.7	1.7	29.9	28	59
	150	2.6	36.2	132.2	1.8	40.5	121.5	2.3	2.3	34.2	34.4	103.8
	200	2.9	39.4	182	2.8	43.2	169.3	2.8	2.8	38.5	38.9	150.6

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทนำ

จากการทดสอบการทำงานของชุดทดลองการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่จัดทำขึ้นนั้นสามารถที่จะทดลองตามใบงานต่างๆ ได้โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาใดๆ ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ผลของแรงดันตกและมุมเฟสที่เปลี่ยนไปของระบบได้อย่างถูกต้องโดยใช้เครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าวัดค่าต่างๆ ที่ต้องการขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบนั่นเอง

### 5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองตามกรณีศึกษาต่างๆ พบว่า ปัจจัยที่มีผลการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นแรงดันตกในสายอันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ในสายส่ง แรงดันที่ป้อนให้กับระบบ ภาระทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า การรักษาระดับแรงไม่ให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด การชดเชยค่า C เข้าไปในระบบ สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งจะต้องมีการวิเคราะห์คำนวณ เพื่อประกอบการวางแผน การแก้ไขปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

### 5.3 ปัญหาโครงงาน และแนวทางแก้ไข

จากการออกแบบโครงงานนั้นจะมีปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้าง รางของตู้จำลองสายส่งไฟฟ้าระยะสั้น เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองตู้สายส่งระยะไกลทางผู้จัดทำได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ประเภทที่ให้ค่าความเหนี่ยวนำ กรณีขนาดตู้และโครงสร้างซึ่งมีขนาดเล็กทำให้มีขนาดของพื้นที่ที่เล็กนั้นทำให้พื้นที่การทำงาน และจัดวางอุปกรณ์ ในตัวโครงงานน้อย ซึ่งอุปกรณ์ที่วางนั้นบางส่วนเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำ ซึ่งอาจส่งผลเหนี่ยวนำอุปกรณ์ที่ไวต่อความเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะหม้อแปลงกระแส ส่วนในการทดลองนั้นจะมีปัญหาเกี่ยวกับโหลดที่มีขนาดเล็กจึงส่งผลทำให้กระแสน้อยมากจึงไม่เห็นความแตกต่างของแรงดันมากนัก จึงทำการแก้ไขโดยการเพิ่มรอบของหม้อแปลงกระแสเพื่อเพิ่มตัวคูณกระแสให้เห็นชัดมากขึ้น

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

ในการดำเนินโครงงานนี้แม้ว่าจะใช้งานได้ตามเงื่อนไขในขอบเขตที่กำหนดขึ้นแต่สามารถที่จะพัฒนาเพิ่มเติมขึ้นได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มากยิ่งขึ้น เช่น

- 5.3.1 การเพิ่มจำนวนบัสให้มากขึ้น โดยเฉพาะบัสจ่ายพวกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 5.3.2 การเพิ่มขนาดของอุปกรณ์ชุดจำลองสายส่งให้มีขนาดที่กำลังสูงขึ้น
- 5.3.3 การเพิ่มภาระโหลด L และ โหลด C

### เอกสารอ้างอิง

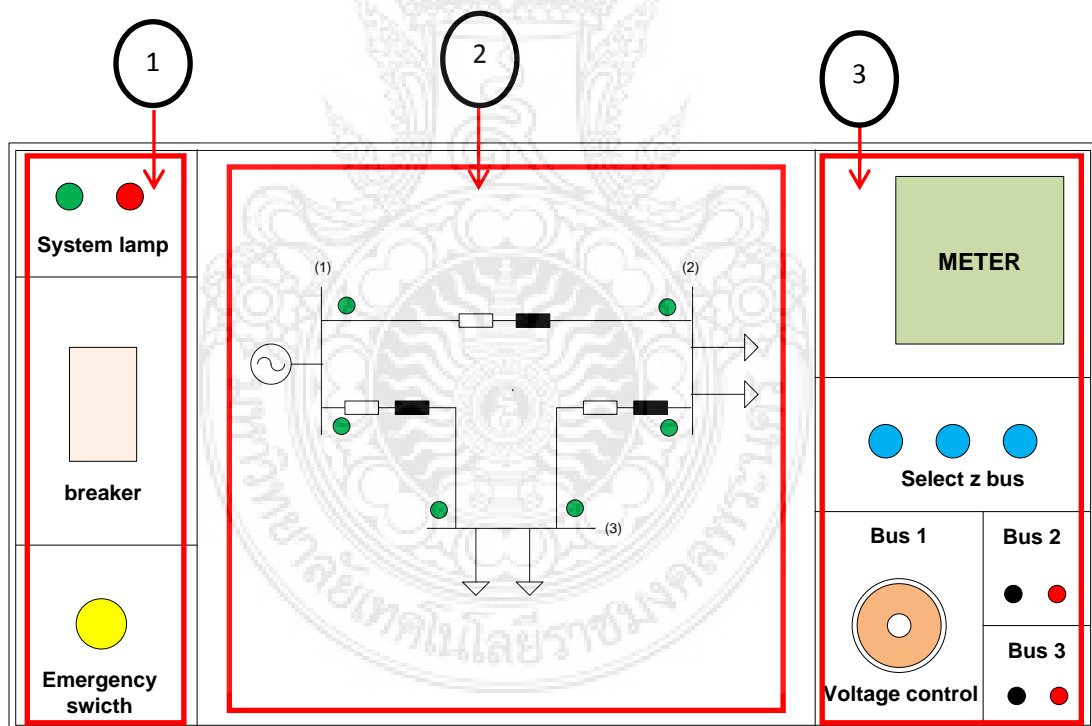
- [1] วิวัฒนา สุนทรานุกรักษ์ บทความเรื่อง “บทความคุณภาพกำลังไฟฟ้า”, www.oppo.co.th, 2548.
- [2] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ (2545). การออกแบบระบบไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท ทีซีซี พรีนติ้ง จำกัด
- [3] Arturo Losi, Mario Russo.: “Dispersed Generation Modeling for Object oriented Distribution Load Flow”, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005.
- [4] Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, Xianzhong Duan.: “Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation”. Power Engineering Society General Meeting, on 18-22 June 2006 .
- [5] Andrés E, Feijóo and José Cidrás.: “Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 15, NO. 1, February 2000
- [6] Wang Zhiquan, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi et al, “Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile”, Automation of Electric Power System, 2004.
- [7] Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula “Electric Power Quality Control Techniques”, Van Nostrand, 2003.

## ภาคผนวก

### คู่มือการใช้งาน

ในส่วนของการออกแบบหน้าตู้ทดลองนั้นได้ทำการออกแบบแบ่งออกเป็นสัดส่วนต่างเป็นสามส่วนคือ

- 1) ส่วนที่เป็นระบบป้องกันไฟฟ้าภายในชุดทดลองอันประกอบไปด้วย เบรกเกอร์ ไฟแสดงสถานะของระบบและสวิตช์ฉุกเฉิน
- 2) ส่วนที่เป็นแสดงสถานะอิมพีแดนซ์ภายในระหว่างบัส ว่ามีการเชื่อมต่อแต่ละบัสหรือไม่ หากมีการเชื่อมต่อ ก็จะมีไฟแสดงสถานะสีเขียว
- 3) ส่วนที่การควบคุมบัสอ้างอิง การเชื่อมต่อบัสกับชุดโหลดทั้งสองชุด การเลือกอิมแดนซ์ระหว่างบัสและมิเตอร์แสดงค่าพารามิเตอร์



แปลนหน้าตู้

ในส่วนของชุดโพลดนั้นได้ทำการออกแบบแยกชุดชุดโพลดออกเป็นสองส่วนตามจำนวนบัลลิสโพลดที่ใช้ในการทดลอง โดยชุดๆหนึ่งนั้นจะประกอบไปด้วยหลอดไฟจำนวน 5 หลอด



ชุดโพลด

#### ขั้นตอนการใช้งาน

1. ทำการเชื่อมต่อบัลลิส 2,3 กับชุดโพลด
2. สับเบรกเกอร์ขึ้น
3. ปรับแรงดันบัลลิสอ้างอิง
4. เลือกบัลลิสอิมพีแดนซ์
5. กดสวิทช์เลือกระดับโพลด
6. ในส่วนของมิเตอร์สามารถกดเลือกดูค่าพารามิเตอร์ทั้งสามบัลลิสได้พร้อมกัน
7. เมื่อมีเหตุการณ์ฉุกเฉินให้กดสวิทช์ฉุกเฉิน
8. เมื่อทดลองเสร็จให้ปรับแรงดันที่บัลลิสอ้างอิงต่ำสุด แล้วจึงทำการสับเบรกเกอร์ลง



## การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

### The Study of Power Flow in Power System

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้สำหรับศึกษาระบบปฏิบัติการของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง อันประกอบไปด้วยการศึกษากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ แรงดันและมุมของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้เป็นแนวทางประกอบการวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งผลจากการทดลองจะช่วยให้คำนวณแรงดันที่จุดต่างๆในระบบกำลังงานสูญเสียในระบบ ตลอดจนใช้วินิจฉัยหาแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น แรงดันตกในระบบ หรือการลัดวงจร เป็นต้น อันเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวางแผนทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

#### Abstract

This paper presents an experiments of the power flow in the power systems. For the operating system of the power flow in the power systems. Comprise with the real power, Reactive power, Voltage in the power system. To guide the planning and operation of power systems. The results of the experiment to calculate the pressure at various points in the Power loss of system. As well as finding solutions to problems. Occurring in the system, such as under voltage or short circuit in the system. This is the basic of stability analysis of power system operation and planning.

#### 1. บทนำ

การใช้พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นทำให้การศึกษาเกี่ยวกับการใช้พลังงานไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นในส่วนต่างๆเริ่มตั้งแต่โรงต้นกำลังระบบส่งจ่ายแล้วการกระจายโหลดปลายทาง ในโครงงานนี้จะศึกษาในส่วนของระบบของสายส่งระยะสั้นซึ่งจะศึกษาในส่วนของแรงดันบนสายส่งต้นทางและปลายทาง มุมเฟสต้นทางและปลายทาง เป็นแบบจำลองสายส่งซึ่งการป้อนแรงดันให้กับสายส่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันบนสายส่งเป็นอย่างไรและเมื่อป้อนแรงดันบนสายส่งขณะไม่ต้องภาระทางไฟฟ้าแบบต่างๆ เกิดผลอะไรขึ้นบ้าง

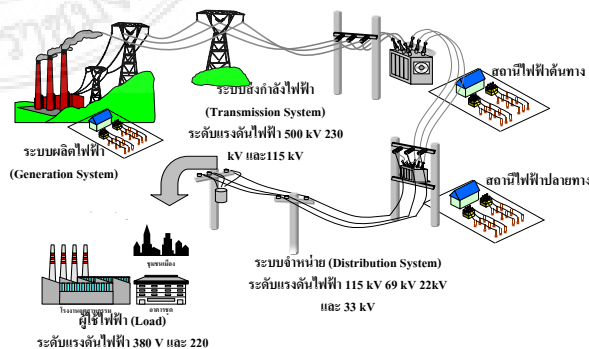
โดยที่จะทำให้มี ผลต่อแรงดันต้นทางและปลายทาง มุมเฟสต้นทางและปลายทาง ซึ่งจะให้ง่ายในการศึกษาจึงมีใบงานการทดลองต่างๆ เพื่อการทดลองและการจดค่าบันทึกการเปลี่ยนแปลงต่างๆเพื่อให้่ง่ายในการวิเคราะห์ปัญหา

บทความนี้แบ่งเนื้อหาเป็นส่วนๆ ดังนี้ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอความรู้เกี่ยวกับระบบไฟฟ้า ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ประกอบกับผลทดสอบ ส่วนที่ 3 เป็นการนำเสนอชุดทดลองที่มีการจำลองบัสทางไฟฟ้าจำนวน 3 บัส โดยได้ทำการทดลองตามสภาวะปกติและสภาวะไม่ปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง แล้ว นำผลจากการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อให้เข้าใจการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

#### 2. การไหลของไฟฟ้ากำลัง

##### 2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการจะศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น พึงทำความเข้าใจเกี่ยวกับ องค์ประกอบของ ระบบไฟฟ้ากำลังก่อน เนื่องจากการไหลของไฟฟ้ากำลังนั้น มีการไหลเป็นระบบ ด้วยเริ่มต้นตั้งแต่ระบบผลิต ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าสลับให้กับระบบไฟฟ้าซึ่งก็คือโรงไฟฟ้าต่างๆ อาทิ โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เป็นต้น ระบบต่อมาคือระบบส่งทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังพื้นที่ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า ส่วนระบบสุดท้ายคือ ระบบจำหน่ายซึ่งระบบทั้ง 3 ได้แสดงดังรูปภาพที่ 1



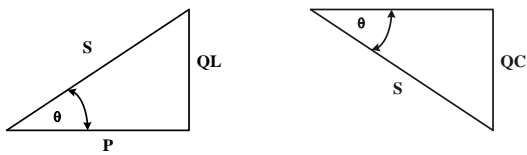
รูปที่ 1 แผนภาพการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceeding of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลังก็คือกำลังไฟฟ้า เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีภาระไหลในระบบตามความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า [1] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาระทางไฟฟ้า โดยจากลักษณะภาระทางไฟฟ้าต่างๆ ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ คือ กำลังไฟฟ้าจริง (Real power) กำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) โดยลักษณะของกำลังไฟฟ้าทั้งสามแบบสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมกำลังทางไฟฟ้าง่ายรูปที่ 2



(ก) โดอะแกรมกำลังของโหลดอินดักทีฟ (ข) โดอะแกรมกำลังของโหลดคาปาซิทีฟ

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด

## 2.2 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

สิ่งที่คำนึงมากที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลังก็คือเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังหมายถึงความสามารถของระบบไฟฟ้าในการรักษาสมดุลของการทำงานภายใต้สภาพการทำงานปกติและยังต้องสามารถที่จะรองรับการกลับสู่สภาพสมดุลที่ยอมรับได้ภายหลังการเกิดการรบกวนในระบบ โดยเสถียรภาพทางไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือเสถียรภาพทางมุม (Angular Stability)[2] และเสถียรภาพทางแรงดัน (Voltage Stability) ในส่วนของเสถียรภาพทางมุมซึ่งก็คือมุมของแรงดันทางไฟฟ้าที่เป็นที่ยอมรับคือค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 0.85 ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการนำซิงโครนัสมอเตอร์วิ่งตัวเปล่าเพื่อชดเชยมุมที่ขาดหายไป ส่วนเสถียรภาพทางแรงดัน ค่าที่ยอมรับได้จะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ คือแรงดันระหว่าง 0.95-1.05 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากไม่ได้เป็นที่ยอมรับก็สามารถแก้ไขโดยนำคาปาซิเตอร์มาชดเชยแรงดันที่ขาดหายไป

จากความสำคัญของเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ก็คือการสามารถควบคุมเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั่นเอง

## 2.3 พื้นฐานการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นการศึกษา ระบบไฟฟ้าในด้านสถานะคงตัว (steady-state)[3] ของระบบไฟฟ้า โดยจะพิจารณากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า จริง กำลังไฟฟ้รีแอก

ทีฟ และ ตัวประกอบกำลัง (power factor) และความสูญเสีย ซึ่งถือว่าเป็นพื้นฐานของการศึกษาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

การศึกษาระบบการไหลของกำลังไฟฟ้า (load flow) นั้นเป็นการศึกษาที่เหมาะสมอย่างยิ่ง สำหรับการจำลองในการวางแผนระบบไฟฟ้า และการพิจารณารูปแบบการจัดการระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ รวมไปถึงการพิจารณาเหตุการณ์ที่ไม่คาดการณ์ (contingency)[4] ของระบบไฟฟ้า เช่นการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลง ซึ่งการศึกษาเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงเหตุการณ์และผลที่จะตามมาในเหตุการณ์นั้นๆ เช่น ในกรณีที่อุปกรณ์ทำงานเกินภาระ หรือโอเวอร์โหลด หรือสภาพแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ การศึกษาระบบการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการศึกษาระบบไฟฟ้าทั่วไปเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการพิจารณาการวางแผนและขยายระบบไฟฟ้า รูปแบบการควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้า

## 2.4 ข้อมูลสำหรับการศึกษาระบบการไหลของกำลังไฟฟ้า

เมื่อทราบถึงพื้นฐานของการไหลของกำลังไฟฟ้า สิ่งที่จะต้องพิจารณาคือการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าก็คือการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย

- เมตริกของความนำไฟฟ้า (admittance)[5] และเมตริกความต้านทานเชิงซ้อน (impedance) ของระบบ
- บัสแกว่งหรือบัสอ้างอิง (swing bus, slack bus) ซึ่งบัสอ้างอิงของระบบ (reference bus) นี้จะกำหนดค่าแรงดันและมุมของแรงดันไว้คงที่ตรงที่ 1 -บัสภาระไฟฟ้า (load bus) คือบัสที่มีภาระไฟฟ้าต่ออยู่ โดยบัสนี้จะมีการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตรงที่ 1 -บัสที่มีแรงดันคงที่ (Voltage magnitude constant bus, generator bus) คือบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและขนาดของแรงดันตรงที่ 1
- อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ของสายส่งเวลาเพิ่มอุปกรณ์เข้ามาในระบบ
- ข้อมูลอื่นๆเช่น พิกัดกำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง พิกัดตัวเก็บประจุ และการตั้งแทปหม้อแปลง

ตารางที่ 1 ลักษณะของการแบ่งแยกชนิดของแต่ละบัส

ชนิดของบัส	ปริมาณที่ทราบค่า	ปริมาณที่ไม่ทราบค่า
slack bus	$ V , \delta$	P, Q
PV bus	P, $ V $	$\delta, Q$
PQ bus	P, Q	$ V , \delta$

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceeding of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

### 2.5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษากาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) ซึ่งรูปแบบของปัญหาจะเป็นการหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัสกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละสายส่ง ตลอดจนการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยในการแก้ปัญหาจะพิจารณาระบบภายใต้ สภาวะสมดุล (Balance condition) และใช้แบบจำลอง 1 เฟส (Single phase model)[6] ในการทดสอบ

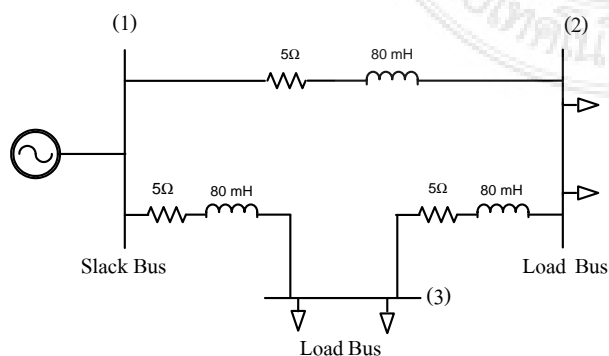
กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น  $n$  บัส โดยที่กำหนดให้บัสหนึ่งบัสมีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่ และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อ บัสตลก (Slack bus) และไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ  $n$  บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาค่าตอบเพียง  $n-1$  บัส เท่านั้น

ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับรูปแบบความยากง่ายของระบบบัสที่จะทำการคำนวณและความเร็วในการคำนวณ ซึ่งการคำนวณจะใช้วิธีการอิตอเรชัน (Iteration)[7] แต่ส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้มีโปรแกรมสำเร็จสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้รวดเร็วต่อการคำนวณ จะช่วยทำให้การวิเคราะห์การแก้ไขปัญหาต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังรวดเร็วตามไปด้วย

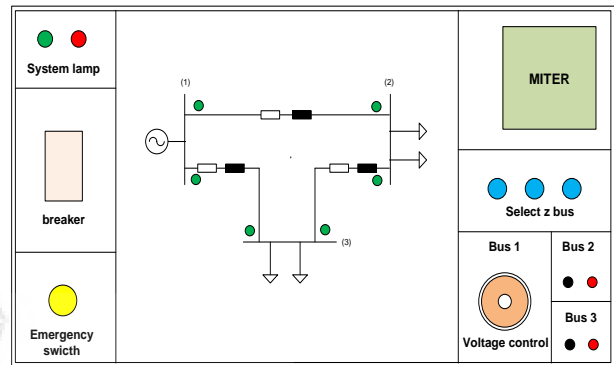
### 3. การออกแบบชุดทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนั้นได้มีการออกแบบ ดังรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

- 5.1 จำนวนบัสทางไฟฟ้า 3 บัส คือ สแลคบัส 1 บัส และ โหลดบัสจำนวน 2 บัส
- 5.2 จำลองสายส่งระยะสั้น 60 กม.
- 5.3 โหลดที่ใช้ในการทดลองเป็นโหลด RL
- 5.4 ใช้เพาเวอร์มิเตอร์ในการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 1 บัสทางไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 2 โครงสร้างชุดทดลอง

ขั้นตอนในการทดลอง

- 1.ปรับแรงดันที่สแลคบัสตามค่าที่กำหนดไว้
- 2.ปรับพิกัด โหลด
- 3.จ่ายกระแสจากสแลคบัสไปยังบัสโหลด
- 4.บันทึกค่า  $P, Q, V$  และมุมของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสจากเพาเวอร์มิเตอร์
- 5.ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าแรงดันและโหลดตามใบงานที่กำหนด

กรณีศึกษาที่ใช้ในการทดลอง

- 1.สภาวะ ไม่มีโหลด

สภาวะไม่มีโหลดนั้น เป็นสภาวะที่ไม่มี การเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าให้กับวงจร ทำให้ไม่มีกระแสไหลในวงจร จึงไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย กำลังไฟฟ้าปรากฏ แรงดันที่บัส 2 และ 3 จึงเท่ากับแรงดันที่บัส 1 ซึ่งเป็นสแลคบัส มุมระหว่างแรงดันกับกระแสจึงไม่มี ผลที่ได้  $\cos 0^\circ$  จึงเท่ากับ 1 ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดสอบสภาวะไม่มีโหลดที่แรงดัน 100 V

Bus	V	A	COS $\theta$	W	Var	VA
1	100	0	1	0	0	0
2	100	0	1	0	0	0
3	100	0	1	0	0	0

- 2.สภาวะมีโหลด

โหลดที่เชื่อมต่อเข้าไปในวงจรนั้นจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นจะ ขึ้นอยู่กับแรงดันที่เปลี่ยนไปของแหล่งจ่าย ภาระ โหลดที่เพิ่มขึ้นหากว่าแหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกำลังให้เพียงพอได้ก็จะทำให้แรงดันตกลง ส่วนมุมทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของโหลด โดยแบ่งเป็น 4 กรณีศึกษา

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceeding of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

กรณีศึกษาที่ 1 กำหนดค่าในการทดสอบให้แรงดันที่ บัส 1 มีค่า  $V = 100$  V, ที่บัส 2  $P = 6.8$  W และ  $Q = 4.2$  Var บัส 3  $P = 9.5$ , และ  $Q = 3.2$  Var ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่

Bus	V	A	COS $\phi$	W	Var	VA
1	100	0.24	-0.97	23.8	6.0	24.5
2	98.6	0.08	-0.87	6.8	4.2	7.7
3	98	0.1	-0.95	9.5	3.2	10

กรณีศึกษาที่ 2 กำหนดค่าในการทดสอบให้แรงดันที่บัส 1  $V = 100$  V, บัส 2  $P = 19.3$  W และ  $Q = 8.5$  Var บัส 3  $P = 39.8$  W และ  $Q = 8.8$  Var ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่

Bus	V	A	COS $\phi$	W	Var	VA
1	100	0.91	-0.99	92.6	8.7	92.6
2	92.3	0.22	-0.91	19.3	8.5	20.7
3	79.5	0.51	-0.97	39.8	8.8	40.3

กรณีศึกษาที่ 3 กำหนดค่าในการทดสอบให้แรงดันที่บัส  $V = 150$  V บัส 2  $P = 37$  W และ  $Q = 37.1$  W บัส 3  $P = 81$  W และ  $Q = 16.3$  Var ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่

Bus	V	A	COS $\phi$	W	Var	VA
1	150	1.15	-0.99	172	0.92	173
2	139	0.28	-0.93	37.1	14.9	39.8
3	126	0.64	-0.98	81.3	16.3	82

กรณีศึกษาที่ 4 กำหนดค่าในการทดสอบให้แรงดันที่บัส  $V = 50$  V บัส 2  $P = 5.8$  W และ  $Q = 2.8$  Var, บัส 3  $P = 9.8$  W และ  $Q = 2.2$  Var ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่

Bus	V	A	COS $\phi$	W	Var	VA
1	50	0.6	-0.99	29.4	6	29.8
2	45	0.14	-0.92	5.8	2.8	6.3
3	29	0.33	-0.98	9.8	2.2	9.9

ในการทดลองตารางที่ 3 และ 4 เป็นการทดลองเปรียบเทียบเมื่อแรงดันที่บัสที่ 1 ป้อนให้กับระบบ 100 โวลต์ โดยที่ภาระทางไฟฟ้าที่

บัส 2 และบัส 3 แตกต่างกัน ปรากฏว่า ภาระทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันที่บัสภาระทางไฟฟ้าจะลดลงตามไปด้วย

ในการทดลองตารางที่ 5 และ 6 เป็นการทดลองที่แรงดันในบัส 1 ป้อนให้กับระบบต่างกัน แสดงภาระทางไฟฟ้าให้เท่ากัน ผลปรากฏว่าสัดส่วนกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แปรผันตรงกับแรงดันในระบบ

## 4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อเราป้อนแรงดัน เข้าไปใน ระบบแรงดันต้นทางและแรงดันปลายทางนั้น มีค่าแรงดันไม่เท่ากันเนื่องจากความต้านทานในสายส่ง โหลดที่เพิ่มขึ้นและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (power factor) ในระบบ เป็นผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าปกติ ทำให้ต้องเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ฉะนั้นในการออกแบบระบบไฟฟ้าจึงต้องคำนึงถึง P, Q, V และมุมของแรงดันไฟฟ้า มาประกอบการออกแบบวิเคราะห์ด้วยเสมอ เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีความเสถียรภาพมากที่สุด

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] วัฒนา สุนทรานุกฤษ บทความเรื่อง “บทความคุณภาพกำลังไฟฟ้า”, www.oppo.co.th, 2548.
- [2] Arturo Losi, Mario Russo.: “Dispersed Generation Modeling for Object oriented Distribution Load Flow”, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005.
- [3] Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, Xianzhong Duan.: “Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation”. Power Engineering Society General Meeting, on 18-22 June 2006 .
- [4] Andrés E, Feijóo and José Cidrás.: “Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 15, NO. 1, February 2000
- [5] Wang Zhiquan, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi et al, “Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile”, Automation of Electric Power System, 2004.
- [6] Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula “Electric Power Quality Control Techniques”, Van Nostrand, 2003.
- [7] G.Celli, and F.Pilo.: “Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks”. Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on, 20-24 May 2001.

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-ชื่อสกุล	นายจตุรนต์ กองชิต
วัน-เดือน-ปีเกิด	15 กุมภาพันธ์ 2532
สถานที่เกิด	จังหวัด ชุมพร
สถานที่อยู่อาศัยปัจจุบัน	เลขที่ 2 หมู่ 4 ตำบล ตะโก อำเภอกอ อ่างทอง จังหวัด ชุมพร 86220
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2552	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคชุมพร
พ.ศ.2555	ปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-ชื่อสกุล	นายรชต คงทอง
วัน-เดือน-ปีเกิด	8 พฤษภาคม 2532
สถานที่เกิด	จังหวัด นครศรีธรรมราช
สถานที่อยู่อาศัยปัจจุบัน	เลขที่ 79/4 หมู่ 1 ตำบล บางจาก อำเภอ เมือง จังหวัด นครศรีธรรมราช 86140
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง
พ.ศ.2552	วิทยาลัยเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมการต่อเรือนครศรี
พ.ศ.2555	ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-ชื่อสกุล	นายศดาญ ไร่กระจายทรัพย์
วัน-เดือน-ปีเกิด	10 มิถุนายน 2530
สถานที่เกิด	จังหวัด แม่ฮ่องสอน
สถานที่อยู่อาศัยปัจจุบัน	เลขที่ 12/3 หมู่ 4 ตำบล บ้านกาศ อำเภอ แม่สะเรียง จังหวัด แม่ฮ่องสอน 58110
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2552	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยการอาชีพแม่สะเรียง
พ.ศ.2555	ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร