

การแก้ไขความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา



นายยุคลธร บรรเทา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSMISSION SYSTEM CONGESTION ALLEVIATION WITH CONSIDERATION OF  
BILATERAL CONTRACTS



Mr. Yukholthorn Bunterng

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแก้ไขความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการ  
ซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

โดย

นายยุคลธร บรรเทิง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

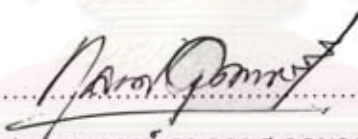
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. บันฑิต เอื้ออาภรณ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภพ นิยมปิตินัน)

ยุทธกร บรรเทิง : การแก้ไขความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าแบบ  
คู่สัญญา. (TRANSMISSION SYSTEM CONGESTION ALLEVIATION WITH  
CONSIDERATION OF BILATERAL CONTRACTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.  
ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี. 115 หน้า.

กิจการไฟฟ้านั้นเป็นสาธารณูปโภคหลักที่สำคัญของประเทศ ซึ่งแต่เดิมภาครัฐจะเป็น  
ผู้ดำเนินการเพียงผู้เดียว ส่วนผู้ซื้อไฟฟ้าไม่สามารถเลือกซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายอื่นได้ แต่ใน  
ปัจจุบันหลายประเทศได้ทำการปรับโครงสร้างและการแปรรูปกิจการไฟฟ้าขึ้น ซึ่งทำให้กิจการ  
ไฟฟ้ามีการแข่งขันกันมากขึ้นและมีการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อผู้ใช้ไฟฟ้า  
ในการที่จะสามารถเลือกซื้อไฟฟ้าเพื่อให้ได้คุณภาพและมีบริการที่ดีในราคาที่เหมาะสม โดยทั่วไป  
กิจการไฟฟ้าหลังจากการเปลี่ยนโครงสร้างจะก่อให้เกิดรูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้า 3 รูปแบบ  
หลัก คือ การซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา และการซื้อขายไฟฟ้า  
แบบผสมระหว่างการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางและการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

โดยปกติระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่มีความเสี่ยงที่จะมีอุปกรณ์ทำงานผิดปกติทำให้เกิดปัญหา  
ความแออัดในระบบ เมื่อเกิดปัญหาความแออัดขึ้นในระบบส่ง หากระบบดังกล่าวไม่ได้รับการ  
ปัญหาอย่างรวดเร็วและมีความเหมาะสม อาจส่งผลให้ระบบทำงานผิดพลาด สูญเสียเสถียรภาพ  
ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ สำหรับระบบไฟฟ้าหลังการแปรรูปการแก้ไขปัญหาคความ  
แออัดก็จะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการแก้ไข  
ปัญหาคความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา โดยใช้  
วิธีการปลดโหลดในคู่สัญญา การปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปรับแท็ปหม้อแปลงของ  
ระบบร่วมกัน โดยการแก้ปัญหานี้จะมุ่งเน้นประมาณรูปแบบของฟังก์ชันก่ในการแก้ปัญหาให้เป็น  
แบบเชิงเส้นเพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น  
เพื่อให้ได้การปลดโหลด การปรับแรงดันที่บัส และการปรับแท็ปหม้อแปลงที่เหมาะสมที่สุด วิธีการ  
ที่นำเสนอได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบ IEEE RTS-79 ผลการทดสอบที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
ปีการศึกษา..... 2553.....

ลายมือชื่อนิสิต..... ยุทธกร บรรเทิง.....  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *Porn Pong*.....



## 5270686621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LOAD SHEDDING / TAP-CHANGING / BILATERAL CONTRACTS

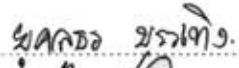
YUKHOLTHORN BUNTERNG : TRANSMISSION SYSTEM CONGESTION  
ALLEVIATION WITH CONSIDERATION OF BILATERAL CONTRACTS.

ADVISOR: ASST.PROF. KULYOS AUDOMVONGSEREE, Ph.D., 115 pp.

Nowadays, Power system structures around the world are changed a vertically integrated system, where consumers can only buy electricity from a utility, to a more open market system, where consumers can choose their supplier. Under these new structures, there are three main types of markets structures, i.e. pool-based model, bilateral-contract-based models and hybrid model.

Generally, a huge power system may have high risk of equipment failure leading to congestion problems. These problems may cause serious blackout unless proper load shedding scheme is performed in time. The proper load shedding schemes vary depending on the power market structures. This thesis proposes a transmission congestion management by load shedding scheme altogether with adjustment of voltage at generator and adjustment of the transformer's tap in the bilateral contract market. In this thesis, the linearization technique to transform the nonlinear optimization model to an approximated linearized model is used. With the approximated linear optimization model, it can solve the problem under contingency condition with faster speed while retaining acceptable accuracy; therefore it is suitable to be used in practice. This proposed method has been tested with IEEE RTS-79 system. Satisfactory results were obtained.

Department : Electrical Engineering .....

Student's Signature 

Field of Study : Electrical Engineering .....

Advisor's Signature 

Academic Year : 2010 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุลยศ อุดมวงศ์ เสรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข รวมถึงให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนทบุรี หุนเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐภพ นิรมิตินันท์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทำยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Calculation).....	5
2.1.1 แบบจำลององค์ประกอบพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	5
2.1.2 สมการแสดงคุณลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	7
2.1.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	8
2.2 ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน PQVSI.....	12
2.3 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าหลังการแปรรูป.....	16
2.3.1 รูปแบบการซื้อขายไฟฟ้าหลังการแปรรูป.....	17
บทที่ 3 การแก้ไขความแออัดของระบบที่นำเสนอ.....	20
3.1 จุดประสงค์ของการแก้ไขความแออัดของระบบส่ง.....	20
3.2 เมตริกซ์การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	20
3.3 การแก้ไขความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	21
3.3.1 การประมาณเชิงเส้น.....	22
3.3.2 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่บัส ที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	23

3.3.3 การประมาณเชิงเส้นของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	27
3.3.4 การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	28
3.3.5 การประมาณเชิงเส้นของดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	30
3.3.6 การจัดรูปของการประมาณเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหาค่าขีดสุด.....	34
3.4 การแก้ปัญหาความแออัดของสายส่งในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา โดยใช้ฟังก์ชันในการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้น.....	35
3.5 ขั้นตอนการแก้ปัญหาความแออัดในระบบส่ง ที่มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา..	36
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	38
4.1 ระบบทดสอบ.....	38
4.2 การวิเคราะห์ความไวที่มีต่อการปรับพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ.....	39
4.2.1 ความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่มีต่อการปรับแก้หม้อแปลงและแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	39
4.2.2 ความไวของดัชนีเสถียรภาพเชิงแรงดันที่มีต่อการปรับแก้หม้อแปลงและแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	41
4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความไวด้วยการประมาณเชิงเส้นที่นำเสนอกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยตรง.....	42
4.3.1 การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา.....	43
4.3.2 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่ไหลดัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา.....	44
4.3.3 การประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา.....	45
4.3.4 การประมาณเชิงเส้นของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา.....	46
4.3.5 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่ไหลดัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	47



4.3.6 การประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	48
4.3.7 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่โหลดบัลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลง.....	49
4.3.8 การประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลง.....	50
4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบการแก้ไขความแออัดในระบบส่งภายใต้โครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	61
รายการอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	38
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2.....	43
ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2.....	44
ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2.....	45
ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2.....	46
ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1.....	47
ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1.....	48
ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงเครื่องที่ 3.....	49
ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3.....	50
ตารางที่ 4.10 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 1.....	52
ตารางที่ 4.11 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 2.....	54
ตารางที่ 4.12 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 3.....	56
ตารางที่ 4.13 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 4.....	58
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE-RTS79.....	66
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	67
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า.....	68
ตารางที่ ข.1 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1.....	72
ตารางที่ ข.2 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1.....	74





ตารางที่ ข.33 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัลเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าบัลที่ 2.....	110
ตารางที่ ข.34 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัลที่ 2.....	111
ตารางที่ ข.35 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัลเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าบัลที่ 18.....	111
ตารางที่ ข.36 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัลที่ 18.....	112
ตารางที่ ข.37 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัลเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าบัลที่ 21.....	113
ตารางที่ ข.38 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัลที่ 21.....	114



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	5
รูปที่ 2.2 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแบบ Off-nominal.....	6
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลแบบ $\pi$ .....	6
รูปที่ 2.4 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า.....	7
รูปที่ 2.5 บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	8
รูปที่ 2.6 แบบจำลองของสายส่งแบบ $\pi$ .....	12
รูปที่ 2.7 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ ณ สภาวะที่เกิด การพังทลายของแรงดัน.....	14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังหลังการแปรรูป.....	16
รูปที่ 2.9 รูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 2.10 รูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา.....	19
รูปที่ 2.11 รูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสม.....	19
รูปที่ 3.1 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแบบ Off-nominal.....	23
รูปที่ 3.2 แบบจำลองวงจรสมมูลแบบ $\pi$ .....	23
รูปที่ 3.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง โดยใช้วงจรสมมูลแบบ $\pi$ .....	28
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการแก้ปัญหาค่าความแออัด.....	37
รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบ IEEE-RTS 79.....	39
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกับอัตราส่วนการ ปรับแก้หม้อแปลง.....	40
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกับการปรับแรงดัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	40
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับอัตราส่วนการ ปรับแก้หม้อแปลง.....	41
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับการปรับแรงดัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	42
รูปที่ 4.6 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีที่ 1.....	52
รูปที่ 4.7 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีที่ 2.....	54
รูปที่ 4.8 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีที่ 3.....	56

รูปที่ 4.9 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีนี้ 4..... 58



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กิจการไฟฟ้านั้นเป็นสาธารณูปโภคหลักที่สำคัญของประเทศ ซึ่งแต่เดิมภาครัฐจะเป็นผู้ดำเนินการเพียงฝ่ายเดียว ผู้ซื้อไฟฟ้าไม่สามารถเลือกซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายอื่นได้ แต่ในปัจจุบันหลายประเทศได้ทำการปรับโครงสร้างและการแปรรูปกิจการไฟฟ้าขึ้น ซึ่งทำให้กิจการไฟฟ้ามีการแข่งขันกันมากขึ้นและการดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลดีต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในการที่จะสามารถเลือกซื้อไฟฟ้าเพื่อให้คุณภาพและมีบริการที่ดีในราคาที่เหมาะสมได้ [1]

โครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าภายหลังการแปรรูปในหลายประเทศจะเป็นการซื้อขายไฟฟ้าแบบเสรี (Open Market System) ซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างได้เป็น 3 แบบหลัก คือ การซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง (Pool Model) การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา (Bilateral Contracts Model) และการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสม (Hybrid Model) ซึ่งมีลักษณะการซื้อขายไฟฟ้าทั้งแบบผ่านตลาดกลางและการซื้อขายแบบคู่สัญญา โดยทั่วไป หลังการแปรรูปกิจการไฟฟ้าแล้ว จะมีการแยกธุรกิจที่ผูกขาดออกจากธุรกิจที่มีการแข่งขัน ซึ่งในแต่ละธุรกิจที่สามารถแข่งขันได้ก็จะมาสมัครส่งเสริมให้มีการแข่งขันอย่างเต็มที่ ส่วนธุรกิจที่ผูกขาดหรือมีส่วนที่ต้องการความเป็นกลาง ก็จะมีองค์กรกำกับดูแลควบคุมการดำเนินงานของระบบไฟฟ้าเพื่อประสานงานระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้ารวมถึงการจัดการด้านการเงิน ควบคุมราคา มาตรฐาน และคุณภาพการดำเนินการ ซึ่งเรียกว่า ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (Independent System Operation; ISO)

โดยปกติระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่มีความเสี่ยงที่จะมีอุปกรณ์ทำงานผิดปกติทำให้เกิดปัญหาความแออัดในระบบ เมื่อเกิดปัญหาความแออัดขึ้นในระบบส่ง หากระบบดังกล่าวไม่ได้รับการแก้ไขอย่างรวดเร็วจึงมีความเหมาะสม อาจส่งผลให้ระบบทำงานผิดพลาด สูญเสียเสถียรภาพ ส่งผลให้เกิดไฟฟาดับเป็นบริเวณกว้างได้ สำหรับระบบไฟฟ้าหลังการแปรรูปการแก้ไขปัญหาความแออัดก็จะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำแก้ไขความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่แตกต่างจากการแก้ไขความแออัดในระบบโดยทั่วไปคือ จะพิจารณาการแก้ไขความแออัดในระบบส่งสำหรับโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าภายหลังการแปรรูปแบบคู่สัญญา ซึ่งเป็นปัญหาที่ยังมีผู้วิจัยไม่มากนัก ในกรณีที่ระบบมีความผิดปกติเกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นความผิดปกติทางด้านสายส่งหรือความผิดปกติทางแรงดันนั้น ISO อาจทำการปรับกำลังการผลิต ปรับแท๊ปของหม้อแปลง ปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัดโหลดบางส่วนในแต่ละสัญญาออกจากระบบเพื่อให้ระบบโดยรวมสามารถคงอยู่ได้ อย่างไรก็ดี สำหรับการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญานั้นเมื่อ ISO ทำการตัดโหลด

ออกแล้วจะต้องทำการส่งปลดกำลังการผลิตของคู่สัญญาในปริมาณที่เท่ากันด้วย ปัญหาการปลดโหลดนั้นนอกจากจะเป็นปัญหาทางเทคนิคทางวิศวกรรมแล้วยังมีผลทางด้านการเงินเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเนื่องจากต้องมีการจ่ายค่าชดเชยผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในระบบ ดังนั้น ในการแก้ปัญหาการปลดโหลดนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการที่สามารถควบคุมการดับไฟของผู้ใช้ไฟฟ้าให้น้อยที่สุดและยังสามารถทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพดังเดิมได้ภายใต้ข้อจำกัดทางด้านเวลาในสถานการณ์ฉุกเฉิน ในการที่จะแก้ปัญหาการปลดโหลดนั้นเพื่อให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพดังเดิม จำเป็นจะต้องมีเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ความเสถียรภาพของระบบได้

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือเสถียรภาพเชิงมุมและเสถียรภาพเชิงแรงดัน [2] ในการศึกษาเสถียรภาพเชิงมุมนั้นจะเกี่ยวข้องกับศึกษาความสัมพันธ์ของการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบภายใต้การรบกวนในสภาวะชั่วคราวโดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์ในเชิงเวลา (Time-Domain Simulation) ส่วนในการศึกษาเสถียรภาพเชิงแรงดันจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาความสัมพันธ์ของการรักษาแรงดันในระบบเมื่อระบบมีความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์ในสภาวะอยู่ตัว (Steady-State Simulation) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาเฉพาะการแก้ปัญหาการปลดโหลดโดยคำนึงถึงเสถียรภาพเชิงแรงดันเป็นหลัก วิธีการที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดันนั้นมีด้วยกันหลายวิธีซึ่งทั้งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธีการ Continuation Power Flow เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก [3] แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในขั้นตอนการปฏิบัติการ (Operation) เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของเวลาโดยเฉพาะการวิเคราะห์ในสถานการณ์ฉุกเฉิน อีกวิธีหนึ่งที่สามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วและสามารถถูกนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ดีคือดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันมีอยู่ด้วยกันหลากหลายชนิด [4] ซึ่งดัชนีแต่ละตัวจะมีความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยหลักการของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันที่เรียกว่า PQVSI ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูง และสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการแก้ปัญหาการแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาเฉพาะการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดแบบคู่สัญญา (Bilateral Contract Market) ซึ่งจะอาศัยวิธีการปลดโหลดในคู่สัญญา การปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปรับแท็ปหม้อแปลงร่วมกัน โดยขีดจำกัดของระบบที่ทำการพิจารณาประกอบด้วย ขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ขีดจำกัดแรงดัน ขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขีดจำกัดเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ ซึ่งการแก้ปัญหานี้จะมุ่งเน้นปรับปรุงวิธีการที่ใช้ในการวัดเสถียรภาพเชิงแรงดันให้มีความรวดเร็ว รวมทั้งจะประมาณรูปแบบของฟังก์ชันในการแก้ปัญหาให้เป็นแบบเชิงเส้นเพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการแก้ปัญหาความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดแบบคู่สัญญา (Bilateral Contract Market)
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาความแออัดของระบบส่งให้ที่มีความรวดเร็ว และสามารถใช้ในขั้นตอนปฏิบัติการได้
3. เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับการแก้ปัญหาความแออัดของระบบส่งไฟฟ้าสำหรับการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาเฉพาะโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา
2. กำหนดให้ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (ISO) เป็นผู้ควบคุมระบบ และรับผิดชอบการปลดโหลดในคู่สัญญา การปรับแรงดัน และการปรับแก้หม้อแปลง เพื่อแก้ไขปัญหาความแออัดในระบบส่ง
3. ศึกษาเฉพาะขีดจำกัด ขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ขีดจำกัดแรงดัน ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขีดจำกัดเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ
4. ศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแบบ 3 เฟสสมดุล และทำงานในสภาวะอยู่ตัว
5. ไม่พิจารณาผลจากฮาร์โมนิกส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง
6. กำหนดให้แบบจำลองโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงที่

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังก่อนและหลังการแปรรูป
2. ศึกษาเครื่องมือที่ใช้วัดความถี่เสถียรภาพทางแรงดันของระบบ
3. ศึกษาวิธีการประมาณเชิงเส้นของปัญหาการแก้ความขัดข้องของระบบส่ง
4. กำหนดขอบเขตรวมถึงรายละเอียดของข้อมูลต่างๆที่ใช้อ้างอิง
5. ทดสอบวิธีการที่นำเสนอ โดยการออกแบบการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน
6. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
7. เรียบเรียงผลงานวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. วิธีการแก้ปัญหาที่เกิดความแออัดในระบบส่งสำหรับการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดแบบคู่สัญญา (Bilateral Contract Market)
2. โปรแกรมที่ใช้ในการแก้ปัญหาความแออัดในระบบส่ง โดยวิธีที่นำเสนอ



## 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอได้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมเป็นดังต่อไปนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้สำหรับการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ในระบบส่งซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน PQVSI และจะอธิบายพื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบไฟฟ้าก่อนการแปรรูป และระบบไฟฟ้ากำลังหลังการแปรรูป

บทที่ 3 จะกล่าวถึงจุดประสงค์ของการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ เมตริกซ์การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา การประมาณเชิงเส้นของตัวแปรเพื่อนำมาแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ของระบบส่ง การแก้ปัญหาคอมพิวเตอร์ของสายส่งในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา โดยใช้การประมาณแบบเชิงเส้นมาช่วยแก้ปัญหา และสรุปขั้นตอนในการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ในระบบส่ง

บทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ของระบบส่งในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

บทที่ 5 จะกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

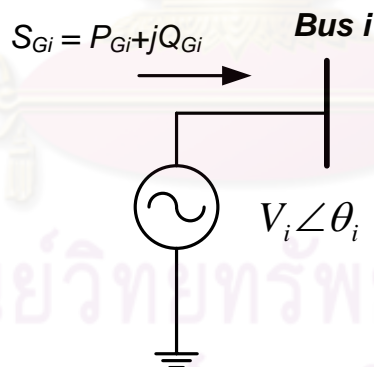
ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขความแออัดของระบบส่งไฟฟ้า โดยรายละเอียดที่นำเสนอจะประกอบด้วย การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน PQVSI และในที่สุดท้ายจะกล่าวถึงโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

### 2.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Calculation)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นพื้นฐานในการแก้ไขความแออัดของระบบส่งไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลององค์ประกอบพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง สมการแสดงคุณลักษณะและวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน

#### 2.1.1 แบบจำลององค์ประกอบพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง

##### 2.1.1.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

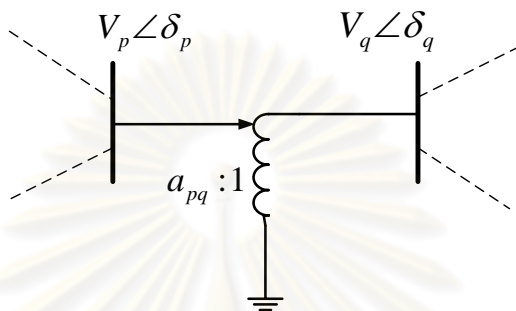


รูปที่ 2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เราสามารถแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตเป็น  $S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$  ได้ด้วยแหล่งกำเนิดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดคงที่ด้วยขนาดแรงดันคงที่ แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

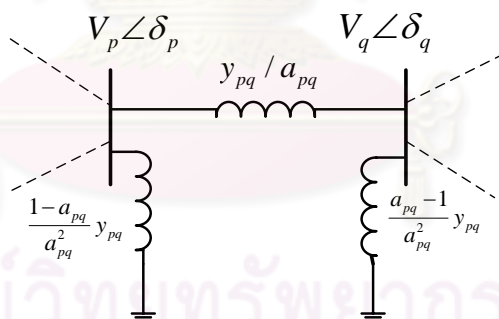
### 2.1.1.2 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า

เราสามารถแทนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดแบบปกติ (Nominal turn-ratio) ด้วยแอดมิตแตนซ์แบบอนุกรม (Series admittance;  $y_t$ ) และสามารถแทนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดแบบไม่ปกติ (Off-nominal turn ratio) ได้โดยการพิจารณาเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงอุดมคติที่มีอัตราส่วนของแท็บเป็น  $a_{pq} : 1$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแบบ Off-nominal

ในกรณีที่  $a_{pq}$  เป็นจำนวนจริง วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ของหม้อแปลง แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



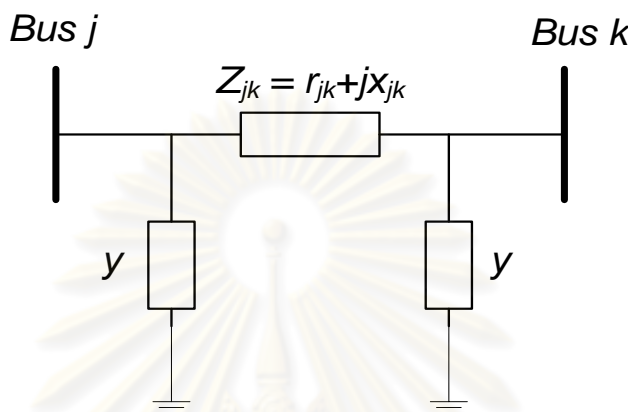
รูปที่ 2.3 แบบจำลองวงจรสมมูลแบบ  $\pi$

สมการบัสแอดมิตแตนซ์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{pq}}{a_{pq}^2} & -\frac{y_{pq}}{a_{pq}} \\ -\frac{y_{pq}}{a_{pq}} & y_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

### 2.1.1.3 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า

สายส่งไฟฟ้าสามารถแทนด้วยแบบจำลองสมมูลแบบ  $\pi$  ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) เป็น  $Z_{jk} = r_{jk} + jx_{jk}$  และค่าแอดมิตแตนซ์ขนาน (Shunt Admittance) เป็น  $y = g + jb$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า

### 2.1.2 สมการแสดงคุณลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไป ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังและกระแสที่ฉีดเข้าสู่ที่ตำแหน่งนั้น ๆ สามารถถูกอธิบายด้วยสมการปม (Node equation) ผ่านเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ (Bus admittance matrix;  $Y_{bus}$ )

การคำนวณหา  $Y_{bus}$  ทำได้โดยอาศัยค่าประจำตัวของอุปกรณ์ หรือส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งในทางวงจรไฟฟ้านั้นเราจะพิจารณาเป็นกิ่ง (Branch) ของวงจร ทั้งนี้ค่าประจำตัวเหล่านี้จะประกอบด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัว (Primitive impedance,  $z$ ) หรือแอดมิตแตนซ์ประจำตัว (Primitive admittance,  $y$ ) ของสายส่งหรือหม้อแปลงที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ

หลักการเบื้องต้นในการสร้าง  $Y_{bus}$  จากค่าประจำตัวของอุปกรณ์หรือส่วนประกอบแต่ละส่วนนั้น จะอาศัยสมมติฐานที่ว่า ส่วนประกอบต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังไม่มีความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance) ระหว่างกัน ซึ่งทำให้เราสามารถสร้าง  $Y_{bus}$  ได้โดยอาศัยวิธีการตรวจพิจารณา (Inspection) ซึ่งมีขั้นตอนในการพิจารณา 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1  $Y_{bus}$  เป็นเมตริกซ์สมมาตร

ขั้นที่ 2  $Y_{ii}$  (Self-admittance) คือ ค่าในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ มีค่าเท่ากับผลรวมทั้งหมดของ Primitive admittance ของส่วนประกอบที่ต่ออยู่กับบัส  $i$  ทั้งหมด

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \quad (2.2)$$

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (2.3)$$

โดยที่

$z_{ij}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างโหนด  $i$  และ  $j$

ขั้นที่ 3  $Y_{ii}$  (Mutual inductance) คือ ค่าที่อยู่นอกแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ มีค่าเท่ากับค่าติดลบของ Primitive admittance ของส่วนประกอบทั้งหมดที่ต่ออยู่ระหว่างบัส  $i$  และ  $j$  ถ้ามีส่วนประกอบทางไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งส่วนประกอบที่ต่อขนานอยู่ระหว่าง 2 บัส ต้องจัดการให้เรียบร้อยก่อนจะนำมาใส่ใน  $Y_{bus}$

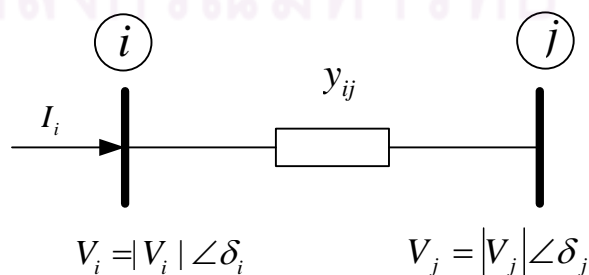
$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.4)$$

จากการพิจารณาด้วยวิธีการตรวจพิจารณา (Inspection) ของระบบ  $n$  บัส จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันประจำบัส (Bus injected current) และกระแสที่ฉีดเข้าบัส (Bus Injected Current) ดังแสดงได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.1.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

เมื่อพิจารณาดำแหน่งหนึ่งๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.5 บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง



จากรูปที่ 2.5 เราสามารถเขียนกระแสที่ฉีดเข้าที่บัส  $i$  ในรูปของเมทริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}||V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) กระแสที่ฉีดเข้าบัสที่  $i$  ซึ่งเขียนในรูปของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ และจากรูปที่ 2.5 เราสามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Power flow equation) สุทธิที่ไหลเข้าบัสที่  $i$  ได้ดังนี้

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}||V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.7)$$

เมื่อแยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจะได้

$$P_{i,cal} = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.8)$$

$$Q_{i,cal} = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.9)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟที่คำนวณได้ตามสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะเท่ากับกำลังไฟฟารวมที่ได้รับการจัดสรรใช้ที่แต่ละบัส นั่นคือ

$$P_{i,sch} - P_{i,cal}(|V|, \delta) = 0 \quad (2.10)$$

$$Q_{i,sch} - Q_{i,cal}(|V|, \delta) = 0 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) จะพบว่า ในการแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับบัสใดๆ โดยทั่วไปเราจะสนใจตัวแปรอยู่ 4 ตัว คือ ขนาดของแรงดันที่บัส ( $|V|$ ) มุมเฟสของแรงดันที่บัส ( $\delta$ ) กำลังไฟฟ้าจริง ( $P$ ) และกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ ( $Q$ ) อย่างไรก็ตามที่แต่ละบัสเราก็จะมีสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 4 นี้ๆอยู่เพียง 2 สมการเท่านั้น ดังนั้นเราจะต้องกำหนดค่าของตัวแปร 2 ตัว เพื่อที่จะคำนวณหาอีก 2 ตัวแปรที่เหลือได้จากตัวแปรทั้ง 4 ตัวดังกล่าวข้างต้น เราสามารถจำแนกประเภทของบัสได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. Slack bus or Reference bus เป็นบัสที่ขนาดของแรงดัน และมุมของแรงดันที่บัสมีค่าคงที่
2. Load bus เป็นบัสกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสมีค่าคงที่
3. Voltage-controlled bus เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดของแรงดันที่บัสจะมีค่าคงที่

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการกรโวลของกำลังไฟฟ้านี้ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบที่รวดเร็วและจำนวนรอบของการทำซ้ำไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการจ้ดรูปแบบปัญหาดังสมการที่ (2.12)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_1^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

จากเมตริกซ์ข้างบนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ย่อย ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

เราเรียกเมตริกซ์  $J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$  ว่า เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) โดยสมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน คือ อนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ  $J_1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.15)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ  $J_2$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.17)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ  $J_3$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.19)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ  $J_4$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.21)$$

โดยที่

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,sch}^{(k)} - P_{i,cal}^{(k)} \quad (2.22)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,sch}^{(k)} - Q_{i,cal}^{(k)} \quad (2.23)$$

ค่าแรงดันที่ประมาณขึ้นใหม่จากวิธีนิวตัน-ราฟสันคือ

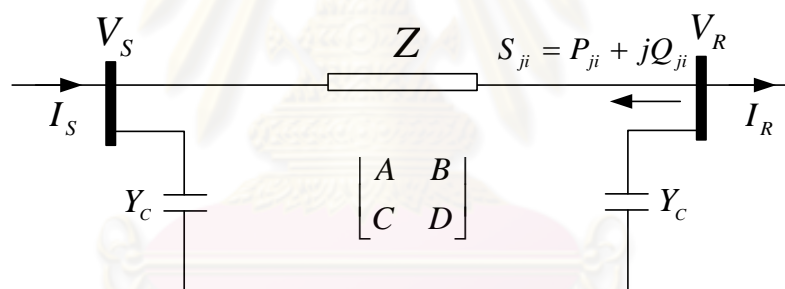
$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.24)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.25)$$

กระบวนการจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า  $\Delta P_i^{(k)}$  และ  $\Delta Q_i^{(k)}$  (Power mismatch) น้อยกว่าค่าความละเอียดที่ยอมรับได้คือ  $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon_1$  และ  $|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon_2$

## 2.2 ดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน PQVSI

ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญที่สุดทั้งในการวางแผนและการปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง การประเมินเสถียรภาพเชิงแรงดันที่แม่นยำและรวดเร็วมีความสำคัญมากในการประกอบการตัดสินใจที่จะจัดการวางแผนให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการประเมินเสถียรภาพเชิงแรงดันคือการประเมินความสามารถของระบบไฟฟ้าที่จะสามารถรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบไป เราจะสามารถบ่งชี้ความมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน โดยดัชนีที่ดีคือ ดัชนีที่สามารถเตือนภัยให้กับผู้ดูแลระบบได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วเมื่อระบบไฟฟ้าใกล้ถึงจุดพังทลาย ซึ่ง PQVSI [4] เป็นดัชนีที่ใช้เพื่อประเมินเสถียรภาพแรงดันของสายส่งไฟฟ้าโดยพัฒนาจากแนวคิดที่ว่า ระบบไฟฟ้ากำลังที่แข็งแรงจะต้องมีจุดทำงานในสภาวะปัจจุบันห่างจากจุดที่เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) มาก ดัชนีที่นำเสนอนี้สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของแบบจำลองสายส่งแบบ ที่มีค่าตัวแปรของสายส่งเป็นแบบวงจร 2 ท่า  $ABCD$  ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของสายส่งแบบ  $\pi$

โดย

$V_S, V_R$  คือ ขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต้นทางและบัสปลายทางตามลำดับ

$S_{ji}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลจากบัสปลายทางไปสู่บัสต้นทาง

โดยที่  $A = 1 + ZY_C$  และ  $B = Z$  โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่บัสใดๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของวงจร 2 ท่าแบบตัวแปร  $ABCD$  ได้ดังสมการที่ (2.26)

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.26)$$

กระแสไฟฟ้าที่บัสปลายทางสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.27)

$$I_R = \left( \frac{-S_{ji}}{V_R} \right)^* \quad (2.27)$$

แทนค่าสมการที่ (2.27) ลงในสมการที่ (2.26) จะสามารถจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ (2.28) - (2.31)

$$V_S V_R^* - A|V_R|^2 = -B(P_{ji} - Q_{ji}) \quad (2.28)$$

$$B^* V_S V_R^* = AB^* |V_R|^2 - |B|^2 (P_{ji} - Q_{ji}) \quad (2.29)$$

$$B^* V_S V_R^* = (|V_R|^2 \operatorname{Re}\{AB^*\} - |B|^2 P_{ji}) + j(|V_R|^2 \operatorname{Im}\{AB^*\} - |B|^2 Q_{ji}) \quad (2.30)$$

$$|B||V_S||V_R| = (|V_R|^2 \operatorname{Re}\{AB^*\} - |B|^2 P_{ji})^2 + (|V_R|^2 \operatorname{Im}\{AB^*\} - |B|^2 Q_{ji})^2 \quad (2.31)$$

เราสามารถจัดรูปสมการที่ (2.31) ให้อยู่ในรูปแบบของสมการกำลังสอง (quadratic equation) ได้ดังสมการที่ (2.32) ซึ่งจะมีคำตอบแสดงได้ดังสมการ (2.33)

$$a(|V_R|^2)^2 + b|V_R|^2 + c = 0 \quad (2.32)$$

$$|V_R|^2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.33)$$

โดย  $a$  คือ  $\operatorname{Re}\{AB^*\}^2 + \operatorname{Im}\{AB^*\}^2$   
 $b$  คือ  $2\operatorname{Im}\{AB^*\}|B|^2 Q_{ji} - 2\operatorname{Re}\{AB^*\}|B|^2 P_{ji} - |B|^2 |V_S|^2$   
 $c$  คือ  $|B|^4 P_{ji}^2 + |B|^4 Q_{ji}^2$

จากสมการที่ (2.33) จะพบว่า คำตอบของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นจำนวนจริงจะมีอยู่สองคำตอบเสมอ แต่ที่จุดพังทลายทางแรงดันนั้น คำตอบของแรงดันทั้งสองจะเป็นจุดเดียวกัน ตามเงื่อนไขสมการที่ (2.34)

$$b^2 - 4ac = 0 \quad (2.34)$$

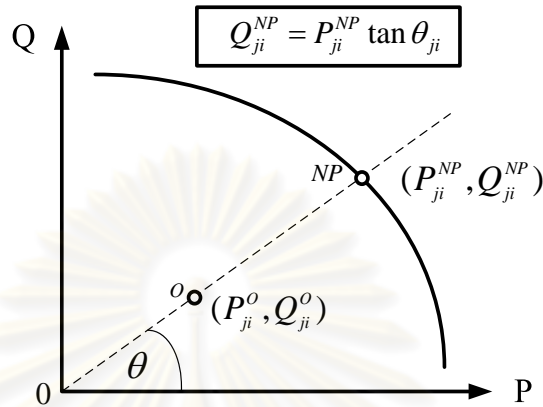
แทนค่า  $a, b$  และ  $c$  ลงในสมการที่ 2.34 จะได้สมการที่ (2.35)

$$\begin{aligned} & |B|^4 (2\operatorname{Im}\{AB^*\}Q_{ji}^{NP} - 2\operatorname{Re}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} - |V_S|^2)^2 \\ & = 4(\operatorname{Re}\{AB^*\}^2 + \operatorname{Im}\{AB^*\}^2)|B|^4 (P_{ji}^{NP2} + Q_{ji}^{NP2}) \end{aligned} \quad (2.35)$$



จัดรูปสมการที่ (2.36) ใหม่ จะได้เป็น

$$(2\text{Im}\{AB^*\}Q_{ji}^{NP} - 2\text{Re}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} - |V_S|^2)^2 = 4|A|^2|B|^2(P_{ji}^{NP^2} + Q_{ji}^{NP^2}) \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ ณ สภาวะที่เกิดการพังทลายของแรงดัน

ความหมายของสมการที่ (2.36) คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลในสายส่งที่สอดคล้องตามสมการนี้ จะทำให้เกิดสภาวะพังทลายของแรงดันขึ้น ความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

ดัชนี PQVSI จะทำการวัดเสถียรภาพของแรงดันตามแนวเส้นประที่แสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่จุดพังทลายทางแรงดันตามเงื่อนไขดังกล่าว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_{ji}^{NP} = P_{ji}^{NP} \tan \theta_{ji} \quad (2.37)$$

แทนค่าสมการที่ (2.37) ลงในสมการที่ (2.36) จะได้เป็น

$$(2\text{Im}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} \tan \theta_{ji} - 2\text{Re}\{AB^*\}P_{ji}^{NP} - |V_S|^2)^2 = 4|A|^2|B|^2P_{ji}^{NP^2} \sec^2 \theta_{ji} \quad (2.38)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.38) เราสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง ณ สภาวะที่เกิดการพังทลายของแรงดันกับพารามิเตอร์ของสายส่งและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันได้ดังสมการที่ (2.39)

$$P_{ji}^{NP} = \frac{|V_s|^2}{2Im\{AB^*\}tan\theta_{ji} - 2Re\{AB^*\} \pm 2|A||B|sec\theta_{ji}} \quad (2.39)$$

เนื่องจากค่า  $sec\theta_{ji} < 0$  เสมอ และสายส่งที่พิจารณากำหนดให้บัสปลายทางมีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่บัสนั้นคือ  $P_{ji}^{NP} < 0$  ดังนั้นจากสมการที่ (2.39) เราสามารถสรุปได้ว่า

$$P_{ji}^{NP} = \frac{|V_s|^2}{2Im\{AB^*\}tan\theta_{ji} - 2Re\{AB^*\} + 2|A||B|sec\theta_{ji}} \quad (2.40)$$

จากแนวคิดที่ว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่แข็งแรงจะต้องมีจุดทำงานในสภาวะปัจจุบันห่างจากจุดที่เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) มาก ดังนั้นดัชนี PQVSI จะถูกนิยามจากอัตราส่วนระหว่างขนาดของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่จุดทำงานปัจจุบันกับขนาดของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่จุดพังทลายทางแรงดัน นั่นคือ

$$PQVSI = \sqrt{\frac{P_{ji}^o{}^2 + Q_{ji}^o{}^2}{P_{ji}^{NP}{}^2 + Q_{ji}^{NP}{}^2}} \quad (2.41)$$

$$PQVSI = \frac{P_{ji}^o}{P_{ji}^{NP}} \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta_{ji}}{1 + \tan^2 \theta_{ji}}} \quad (2.42)$$

ดัชนี PQVSI สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้

$$PQVSI = \frac{P_{ji}^o}{P_{ji}^{NP}} \quad (2.43)$$

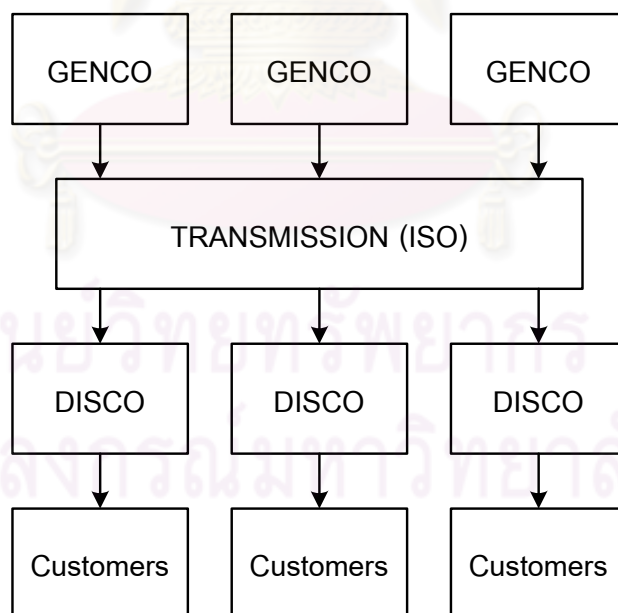
โดย  $P_{ji}^o$  คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัสด้านรับ  
 $P_{ji}^{NP}$  คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงคาดหวังที่จุดพังทลายทางแรงดันที่ไหลออกจากบัสด้านรับ

หากสายส่งที่มีค่าดัชนี PQVSI เข้าใกล้ 1 หมายความว่าสายส่งเส้นดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดปัญหาการพังทลายของแรงดันในระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้

## 2.3 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าหลังการแปรรูป

โครงสร้างของกิจการไฟฟ้าหลังการแปรรูปโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในหลายประเทศจะอยู่ในรูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้าที่มีหน่วยงานเอกชนเข้ามามีส่วนร่วมในการลงทุนมากขึ้น ทำให้เกิดการแข่งขันในกิจการไฟฟ้า ส่งผลให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเลือกซื้อไฟฟ้าได้ตามความพึงพอใจทั้งในด้านราคา คุณภาพ และการบริการที่ดี

การแปรรูปกิจการไฟฟ้าจะมีการแยกธุรกิจที่ผูกขาดออกจากธุรกิจที่มีการแข่งขัน โดยในธุรกิจที่สามารถแข่งขันได้ เช่น ส่วนของการผลิต การส่ง และการจำหน่ายไฟฟ้า ก็จะมีการสนับสนุนให้เกิดการแข่งขันอย่างเต็มที่ โดยที่ระบบผลิต (Generation) จะไปอยู่ในความดูแลของบริษัทผลิตไฟฟ้า (GENCOs) ระบบส่ง (Transmission) ไปอยู่ในความดูแลของบริษัทระบบส่งไฟฟ้า (TRANSCO) และระบบจำหน่าย (Distribution) ไปอยู่ในความดูแลของบริษัทระบบจำหน่ายไฟฟ้า (DISCOs) ส่วนธุรกิจที่ผูกขาดหรือส่วนที่ต้องการความเป็นกลางในการบริหารงาน จะมีองค์กรกำกับดูแล ที่เรียกว่าศูนย์ควบคุมอิสระ (Independent System Operator: ISO) โดยองค์กรนี้จะเข้าไปมีบทบาทในการควบคุมราคา มาตรฐาน คุณภาพและการบริการ รวมทั้งยังมีอำนาจที่จะดำเนินการลงโทษผู้ที่มีได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดในกรณีที่มีการฝ่าฝืนหรือไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดในสัญญาหรือกฎหมาย โครงสร้างระบบไฟฟ้าหลังการแปรรูป แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังหลังการแปรรูป

จุดประสงค์หลักของศูนย์ควบคุมอิสระ คือการควบคุมดูแลให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเพียงพอกับปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้า ในเวลาเดียวกันศูนย์ควบคุมอิสระจะควบคุมการ

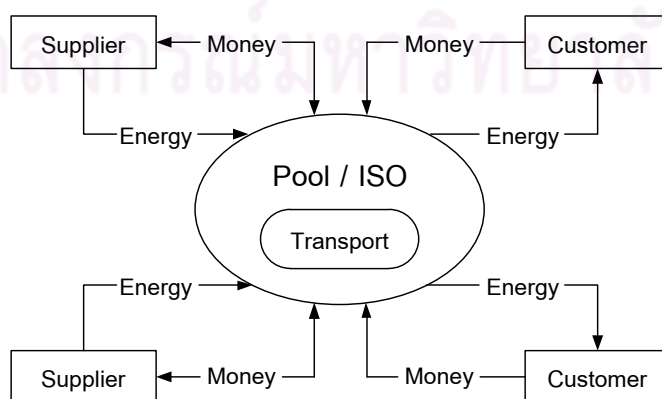
ผลิตให้ระบบมีความเชื่อถือได้ (Reliability) มีการใช้ระบบส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพ (Stability) และความมั่นคง (Security) ในทางกลับกันจุดประสงค์หลักของบริษัทผลิตไฟฟ้า บริษัทระบบส่งไฟฟ้า และบริษัทระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือ การทำให้มีรายได้จากการทำธุรกิจมากที่สุด

### 2.3.1 รูปแบบการซื้อขายไฟฟ้าหลังการแปรรูป

ระบบไฟฟ้ากำลังหลังการแปรรูปจะมีรูปแบบการซื้อขายไฟฟ้าหลัก 3 รูปแบบ คือ การซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Pool Model) การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา (Bilateral Contract Model) และการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสม (Hybrid Model)

#### 2.3.1.1 การซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Pool Model)

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power Pool) เป็นศูนย์รวมของผู้ซื้อไฟฟ้า ผู้ขายไฟฟ้า และข้อมูลที่สำคัญของระบบ เพื่อเสริมสร้างให้เกิดการแข่งขันที่สมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซื้อขายไฟฟ้าลดลง โดยที่ผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าจำนวนมากไม่มีความจำเป็นต้องติดต่อกันโดยตรง แต่มี “ตัวกลาง” ในการซื้อขาย ผู้ซื้อ และ/หรือ ผู้ขายจะต้องจ่ายค่าตอบแทนแก่ผู้ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางตามปริมาณการซื้อขายที่ตกลงกันไว้หรือที่เกิดขึ้นจริงแล้วแต่กรณี ตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้านั้นไม่ต่างจากตลาดกลางการซื้อขายส่งอื่นๆ มากนัก แต่แตกต่างกันที่ สินค้าที่นำมาซื้อขายคือไฟฟ้าในแต่ละช่วงของวัน ซึ่งการจัดส่งไฟฟ้าจะยุ่งยากกว่าสินค้าอื่น เนื่องจากไฟฟ้านั้นไม่สามารถหรือไม่มีความคุ้มค่าในการกักเก็บ ดังนั้น ตลาดกลางขายส่งไฟฟ้าจำเป็นต้องมีหน่วยงานต่างๆ เป็นตัวกลางในการดำเนินงานทางการตลาดอย่างมีประสิทธิภาพ และควบคุมระบบให้มีความมั่นคง ได้แก่ ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (Independent System Operator: ISO) เป็นต้น การซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

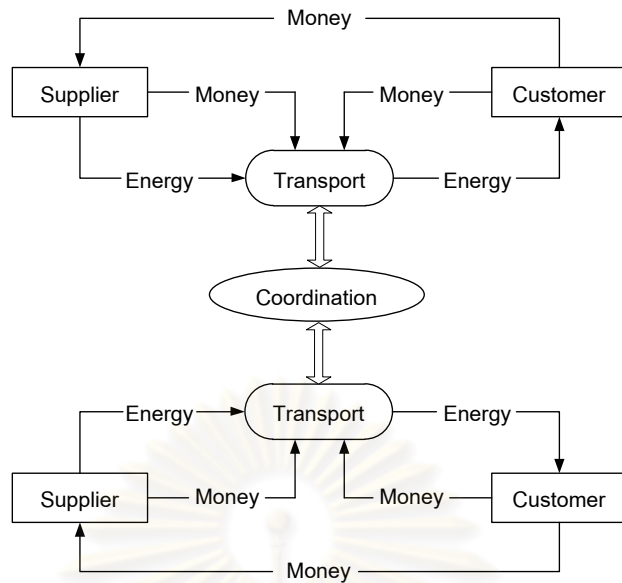
ศูนย์ควบคุมระบบอิสระจะเป็นศูนย์กลางการดำเนินงาน และการกำหนดราคาซื้อ-ขายไฟฟ้าในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า โดยการให้ผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าทำการประมูลราคา (Bidding Prices) และปริมาณไฟฟ้า (Quantity) ที่ต้องการซื้อขายกัน ถ้าผู้ขายส่งราคาประมูลที่สูงเกินไป ก็อาจจะทำให้ผู้ขายรายนั้นไม่ได้รับอนุญาตให้เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผู้ขายที่ส่งราคาประมูลที่ต่ำกว่าก็จะได้รับอนุญาตแทน ในทางกลับกันถ้าผู้ซื้อส่งราคาประมูลที่ต่ำจนเกินไป อาจทำให้ผู้ซื้อรายนั้นไม่ได้รับอนุญาตให้รับพลังงานไฟฟ้าไปได้ ผู้ซื้อที่เสนอราคาสูงกว่าก็จะได้รับพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้ไปแทน นอกจากนี้ศูนย์ควบคุมระบบอิสระควรจะดำเนินการอย่างอิสระ บริหารงานโดยคณะกรรมการบริหารของตน และไม่ควรจะมีความเกี่ยวข้องใดๆ กับหน่วยงานอื่นๆ ในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

โดยหน้าที่ของศูนย์ควบคุมระบบอิสระจะดำเนินงานด้านเทคนิคต่างๆ เช่น การสั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของบริษัทผลิตไฟฟ้า สั่งการดำเนินการของระบบส่งไฟฟ้า และดำเนินการทางด้านการตลาดไม่ว่าจะเป็นกำหนดราคาค่าไฟฟ้า (Market Clearing Price) การวัดปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดกลาง รวมไปถึงการชำระเงินหรือการจัดการด้านการเงินอีกด้วย ซึ่งในส่วนด้านการตลาดนี้อาจจะมีหน่วยงานเอกชนหรือผู้ร่วมค้าในตลาดเป็นผู้ดำเนินการก็ได้ จากที่ได้กล่าวข้างต้นจะพบว่าตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้านั้นมีหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือ

- เป็นศูนย์กลางการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างผู้ผลิตกับผู้ค้าปลีก
- เป็นกลไกในการบริหารงานของระบบไฟฟ้า เช่น การสั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของบริษัทผลิตไฟฟ้า โดยให้บริษัทผลิตไฟฟ้าที่เสนอราคาต่ำที่สุดเริ่มเดินเครื่องก่อน

### 2.3.1.2 การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา (Bilateral Contract Model)

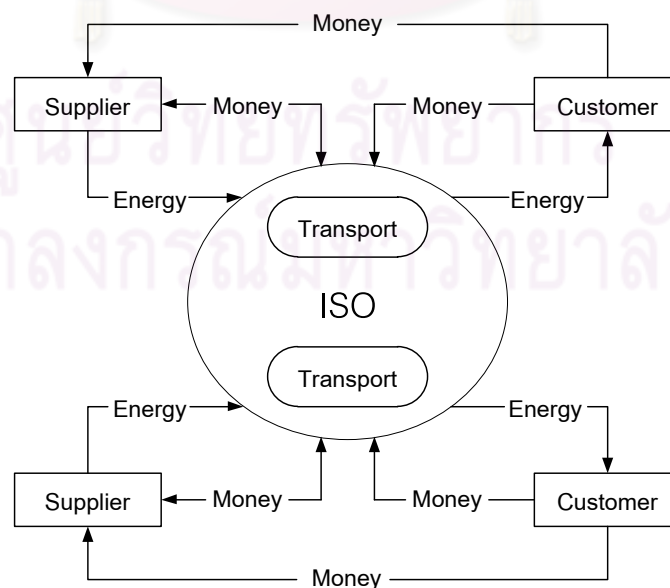
การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาเป็นการซื้อขายกันโดยตรงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายโดยไม่ผ่านตลาดกลางและปราศจากการแทรกแซงของศูนย์ควบคุมระบบอิสระ โดยการซื้อขายจะมีการกำหนดราคาและปริมาณไฟฟ้าที่แน่นอน ทำให้ทั้งสองฝ่ายได้รับราคาที่มีเสถียรภาพตามข้อตกลง เพราะผู้ผลิตไฟฟ้าจะจัดหาไฟฟ้าให้แก่ผู้ซื้อตามที่ตกลงกันไว้โดยไม่ต้องผ่านการประมูลในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า แต่ในการซื้อขายแบบนี้ผู้ผลิตและผู้ซื้อไฟฟ้ายังคงต้องแจ้งข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าและการใช้ไฟฟ้าของตนให้ตลาดกลางทราบ เพื่อนำไปหักออกจากอุปสงค์และอุปทานในตลาดกลางที่ศูนย์ควบคุมระบบอิสระทำการพิจารณา ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาเป็นหลัก โครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

### 2.3.1.3 การซื้อขายไฟฟ้าแบบผสม (Hybrid Model)

การซื้อขายไฟฟ้าแบบผสมจะประกอบด้วยการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้า (Pool Model) และการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา (Bilateral Contract Model) ทำให้การซื้อขายไฟฟ้าแบบนี้มีข้อได้เปรียบจากการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางหรือแบบคู่สัญญาเพียงอย่างเดียวก็คือ ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเลือกที่จะซื้อไฟฟ้าจากการซื้อขายรูปแบบใดก็ได้ตามความต้องการ การซื้อขายในรูปแบบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปแบบของการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสม



### บทที่ 3

#### การแก้ไขความแออัดของระบบส่งที่นำเสนอ

ในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่องของจุดประสงค์ของการแก้ไขความแออัดของระบบส่ง เมตริกซ์การชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา การแก้ไขปัญหาความแออัดในระบบส่งโดยพิจารณาการชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา และขั้นตอนในการแก้ไขปัญหาความแออัด

#### 3.1. จุดประสงค์ของการแก้ไขความแออัดของระบบส่ง

การแก้ปัญหาคความแออัดของระบบส่งนั้นมีจุดประสงค์เพื่อนำระบบที่กำลังอยู่ในสภาวะฉุกเฉินให้กลับมาทำงานอยู่ในสภาวะปกติ โดยก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าให้น้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขขีดจำกัดของระบบ ซึ่งประกอบด้วย ขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ขีดจำกัดแรงดัน ขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขีดจำกัดเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ

#### 3.2. เมตริกซ์การชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา [5],[9]

ในระบบไฟฟ้าที่มีการชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา เราสามารถเปลี่ยนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าที่ฉีด ณ แต่ละบัส ได้ดังสมการนี้ ซึ่งถ้าในระบบไฟฟ้าที่มี  $n$  บัส และ  $m$  คู่สัญญา จะสามารถเปลี่ยนปริมาณการชื้อขายไฟฟ้าของแต่ละคู่สัญญาให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้า ณ แต่ละบัสได้ ดังนี้

$$P_{Bus} = M^T T \tag{3.1}$$

ให้นิยามของเวกเตอร์และเมตริกซ์ที่เกี่ยวข้องกับเมตริกซ์การชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา  
เวกเตอร์  $T$  เป็นเวกเตอร์ของการชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $m \times 1$  โดยที่สมาชิกของแต่ละตัวภายในเวกเตอร์จะแสดงถึงการปริมาณชื้อขายไฟฟ้าของคู่สัญญานั้นๆ

เมตริกซ์  $M$  เป็นเมตริกซ์การชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $m \times n$  โดยที่สมาชิกของแต่ละตัวภายในเมตริกซ์จะแสดงตำแหน่งบัสของการชื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา การนิยามเมตริกซ์  $M$  สามารถทำได้ดังนี้

$m_{ij} = 1$       เมื่อ      การชื้อขายที่  $i$  ถูกส่งมาจากบัส  $j$

$m_{ij} = -1$     เมื่อ      การชื้อขายที่  $i$  ถูกส่งไปยังบัส  $j$

$m_{ij} = 0$       เมื่อ      การชื้อขายเกิดขึ้นที่บัสเดียวกันหรือในกรณีอื่นๆ

เมตริกซ์  $M$  นี้ใช้ในการเปลี่ยนข้อมูลของการซื้อขายไฟฟ้าของเวกเตอร์  $T$  ให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีด ณ บัสต่างๆ ในระบบ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีด ณ บัส  $j$  ( $P_j$ ) สามารถคำนวณได้จากผลรวมของปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าแต่ละการซื้อขายที่เกี่ยวข้องกับบัส  $j$  ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีดเข้าสู่บัสของทุกบัสในระบบสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์  $T$  และเมตริกซ์  $M$  ได้ดังสมการที่ (3.1) ที่ได้แสดงไปแล้ว

โดยที่  $P_{Bus}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีด ณ บัส ที่เกิดจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา  
 $M$  คือ เมตริกซ์การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $m \times n$   
 $T$  คือ เวกเตอร์การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $m \times 1$

ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส สามารถหาได้จาก (3.2)

$$Q_{bus} = P_{bus} \tan \phi = \alpha P_{bus} = [\alpha] M^T T \quad (3.2)$$

โดยที่  $Q_{bus}$  คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ฉีด ณ บัส ที่เกิดจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา  
 $\phi$  คือ มุมระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือน และ กำลังไฟฟ้าจริง  
 $\alpha$  คือ  $\tan \phi$

เราสามารถจัดรูปของทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ที่อยู่ในรูปของปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาได้ดังสมการ (3.3) และสามารถประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการซื้อขายไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการ (3.4)

$$\begin{bmatrix} P_{bus} \\ Q_{bus} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^T \\ [\alpha] M^T \end{bmatrix} [T] \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^T \\ [\alpha] M^T \end{bmatrix} \Delta T \quad (3.4)$$

### 3.3. การแก้ไขความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

โดยทั่วไปแล้วระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์เป็นจำนวนมากนั้น มีโอกาสที่จะมีอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งในระบบเกิดปัญหาขัดข้องได้ง่าย ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมากจนกระทั่งทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ ในการแก้ปัญหาที่นำเสนอจะมีการแก้ปัญหาอยู่สามรูปแบบ คือ การปลดโหลดในระบบออกบางส่วน การปรับแรงดันที่บัส และการ

ปรับแก้ป้อนเปลี่ยนแปลงเพื่อที่จะรักษาเสถียรภาพของระบบโดยรวมเอาไว้ แต่การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา นั้น เมื่อเกิดการปลดโหลดบางส่วนออกจะส่งผลทั้งผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้า โดยเมื่อทำการปลดโหลดออกแล้วจะต้องทำการส่งปลดกำลังการผลิตของคู่สัญญานั้นในปริมาณที่เท่ากันด้วย และในการแก้ไขความแออัดของระบบส่งเมื่อพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาที่นำเสนอนี้เป็นวิธีใหม่ที่แตกต่างจากการแก้ไขความแออัดในระบบโดยทั่วไปคือ จะพิจารณาการแก้ไขความแออัดในโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาเท่านั้น ซึ่งเป็นปัญหาที่ยังมีผู้วิจัยไม่มากนัก

### 3.3.1 การประมาณเชิงเส้น [7]

การประมาณเชิงเส้นคือ การประมาณระบบที่มีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นระบบที่มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น หลักการของการประมาณเชิงเส้นมาจากการประยุกต์ใช้ออนุกรมเทเลอร์ ซึ่งเป็นการหาค่าการเปลี่ยนแปลงรอบจุดทำงานโดยมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (3.5)

$$f(x) = f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \frac{\partial f(x_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial x^2} \Delta x^2 + \dots \quad (3.5)$$

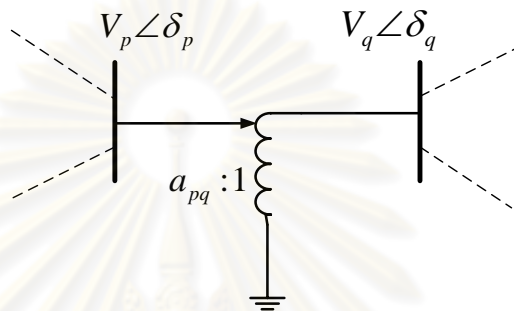
เมื่อทำการประมาณเชิงเส้นโดยสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงรอบจุดทำงาน ( $\Delta x$ ) มีค่าไม่มากนัก เราจะสามารถจัดรูปสมการที่ (3.5) ได้ใหม่ โดยตัดพจน์ที่มีดีกรีมากกว่าหนึ่งออกไป จะได้ผลดังสมการที่ (3.6)

$$\Delta f = f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = \frac{\partial f(x_0)}{\partial x} \Delta x \quad (3.6)$$

เราสามารถนำหลักการประมาณเชิงเส้นมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขความแออัดของระบบส่งได้ โดยทำการประมาณความสัมพันธ์ของขีดจำกัดของระบบ เช่น ขีดจำกัดของสายส่ง ขีดจำกัดของแรงดัน ขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขีดจำกัดทางด้านดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน ให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เราต้องทำการปรับ ซึ่งในที่นี้ก็คือ ปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในแต่ละคู่สัญญา การปรับแรงดันที่บัส และการปรับแก้ป้อนเปลี่ยนแปลงนั่นเอง

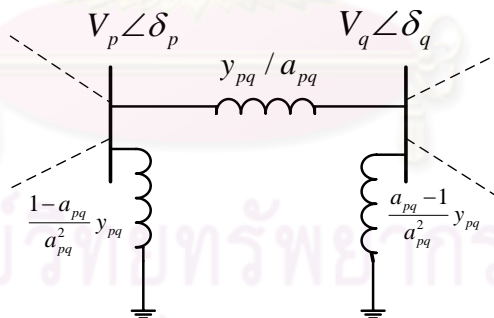
### 3.3.2 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่บัลที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา [8]

ในปัญหาขีดจำกัดของแรงดันที่บัลชนิดโหลดบัล การปลดโหลดในสัญญาซื้อขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาได้ แต่เราสามารถแก้ปัญหาโดยการปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ การปรับแท็ปหม้อแปลง ซึ่งจะสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่บัลให้อยู่ในขอบเขตขีดจำกัดได้ การพิจารณาผลกระทบของแท็ปหม้อแปลงที่มีต่อกำลังไฟฟ้าที่ฉีด ณ บัลแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแบบ Off-nominal

ในกรณีที่  $a_{pq}$  เป็นจำนวนจริง วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ของหม้อแปลง แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองวงจรสมมูลแบบ  $\pi$

สมการบัลแอดมิตแตนซ์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{pq}}{a_{pq}^2} & -\frac{y_{pq}}{a_{pq}} \\ -\frac{y_{pq}}{a_{pq}} & y_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$P_p = V_p^2 G_{pp} + \sum_{k \neq q} V_p V_k (G_{pk} \cos(\delta_p - \delta_k) + B_{pk} \sin(\delta_p - \delta_k)) + V_p V_q (G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) + B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)) \quad (3.8)$$

$$P_q = V_q^2 G_{qq} + \sum_{k \neq p} V_q V_k (G_{qk} \cos(\delta_q - \delta_k) + B_{qk} \sin(\delta_q - \delta_k)) + V_q V_p (G_{qp} \cos(\delta_q - \delta_p) + B_{qp} \sin(\delta_q - \delta_p)) \quad (3.9)$$

$$Q_p = -V_p^2 B_{pp} + \sum_{k \neq q} V_p V_k (G_{pk} \sin(\delta_p - \delta_k) - B_{pk} \cos(\delta_p - \delta_k)) + V_p V_q (G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)) \quad (3.10)$$

$$Q_q = -V_q^2 B_{qq} + \sum_{k \neq p} V_q V_k (G_{qk} \sin(\delta_q - \delta_k) - B_{qk} \cos(\delta_q - \delta_k)) + V_q V_p (G_{qp} \sin(\delta_q - \delta_p) - B_{qp} \cos(\delta_q - \delta_p)) \quad (3.11)$$

โดยที่

$$G_{pp} = G'_{pp} + \frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \quad G_{pq} = -\frac{g_{pq}}{a_{pq}}$$

$$B_{pp} = B'_{pp} + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \quad B_{pq} = -\frac{b_{pq}}{a_{pq}}$$

$$G_{qp} = -\frac{g_{qp}}{a_{pq}} \quad G_{qq} = g_{qp}$$

$$B_{qp} = -\frac{b_{qp}}{a_{pq}} \quad B_{qq} = b_{qp}$$

จากการประมาณเชิงเส้น เราสามารถจัดรูปการประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ฉีดที่บัส ดังสมการที่ (3.12) และ (3.13)

$$[\Delta P] = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] [\Delta \delta] + \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] [\Delta V] + \left[ \frac{\partial P}{\partial a} \right] [\Delta a] \quad (3.12)$$

$$[\Delta Q] = \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] [\Delta \delta] + \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] [\Delta V] + \left[ \frac{\partial Q}{\partial a} \right] [\Delta a] \quad (3.13)$$

โดยที่  $\partial P_i / \partial \delta$ ,  $\partial P_i / \partial V$ ,  $\partial Q_i / \partial \delta$  และ  $\partial Q_i / \partial V$  สามารถคำนวณได้จากจาโคเบียนของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 อย่างไรก็ตามส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับ บัสควบคุมแรงดัน จะถูกนำมาพิจารณาในสมการนี้ด้วย ส่วนเทอมของ  $\partial P_i / \partial a$  และ  $\partial Q_i / \partial a$  สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial P_p}{\partial a_{pq}} = V_p^2 \left( -\frac{2g_{pq}}{a_{pq}^3} \right) + V_p V_q \left( \frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_p - \delta_q) + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_p - \delta_q) \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial P_q}{\partial a_{pq}} = V_p V_q \left( \frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_q - \delta_p) + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_q - \delta_p) \right) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_{pq}} = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial a_{pq}} = V_p^2 \left( \frac{2b_{pq}}{a_{pq}^3} \right) + V_p V_q \left( \frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_p - \delta_q) - \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_p - \delta_q) \right) \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial Q_q}{\partial a_{pq}} = V_p V_q \left( \frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_q - \delta_p) + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_q - \delta_p) \right) \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{pq}} = 0 \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.12) จัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3.20)

$$[\Delta\delta] = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} [\Delta P] - \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] [\Delta V] - \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial P}{\partial a} \right] [\Delta a] \quad (3.20)$$

นำสมการที่ (3.20) แทนลงในสมการ (3.13) จะได้สมการที่ (3.21)

$$\begin{aligned} [\Delta Q] = & \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} [\Delta P] + \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] - \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] [\Delta V] \\ & + \left[ \frac{\partial Q}{\partial a} \right] - \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial P}{\partial a} \right] [\Delta a] \end{aligned} \quad (3.21)$$

ทำการจัดรูปอย่างง่ายของสมการที่ (3.21) จะได้สมการที่ (3.22)

$$[\Delta Q] = [M][\Delta P] + [N][\Delta V] + [O][\Delta a] \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.22) แบ่งสมการออกเป็นส่วนของบัสควบคุมแรงดัน (PV-bus) และโหลดบัส (PQ-bus) ดังสมการที่ (3.23)

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_i^{PV} \\ \Delta Q_i^{PQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \end{bmatrix} [\Delta P_i] + \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V^{PV} \\ \Delta V^{PQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{11} \\ O_{21} \end{bmatrix} [\Delta a] \quad (3.23)$$



เพราะฉะนั้นสามารถแยกสมการได้เป็นสมการที่ (3.24)-(3.25)

$$[\Delta Q_i^{PV}] = [M_{11}][\Delta P_i] + [N_{11}][\Delta V^{PV}] + [N_{12}][\Delta V^{PQ}] + [O_{11}][\Delta a] \quad (3.24)$$

$$[\Delta Q_i^{PQ}] = [M_{21}][\Delta P_i] + [N_{21}][\Delta V^{PV}] + [N_{22}][\Delta V^{PQ}] + [O_{21}][\Delta a] \quad (3.25)$$

เมื่อพิจารณาที่โหลดบัส สามารถจัดรูปสมการที่ (3.25) ได้เป็นสมการที่ (3.26)

$$\begin{aligned} [\Delta V^{PQ}] &= [N_{22}]^{-1}[\Delta Q_i^{PQ}] - [N_{22}]^{-1}[M_{21}][\Delta P_i] - [N_{22}]^{-1}[N_{21}][\Delta V^{PV}] \\ &\quad - [N_{22}]^{-1}[O_{21}][\Delta a] \end{aligned} \quad (3.26)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟดังสมการที่ (3.27)

$$\begin{aligned} [\Delta Q_i] &= [\alpha][\Delta P_i] \\ \begin{bmatrix} \Delta Q_i^{PV} \\ \Delta Q_i^{PQ} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_i^{PV} \\ \Delta P_i^{PQ} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.27)$$

พิจารณาที่ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดบัสได้ดังสมการที่ (3.28)

$$[\Delta Q_i^{PQ}] = [0 \quad \alpha] \begin{bmatrix} \Delta P_i^{PV} \\ \Delta P_i^{PQ} \end{bmatrix} = [0 \quad \alpha][\Delta P_i] \quad (3.28)$$

แทนค่า  $\Delta Q_i^{PQ}$  จากสมการที่ (3.28) ในสมการที่ (3.26) จะได้สมการที่ (3.29)

$$\begin{aligned} [\Delta V^{PQ}] &= [[N_{22}]^{-1}[0 \quad \alpha] - [N_{22}]^{-1}[M_{21}]][\Delta P_i] + [-[N_{22}]^{-1}[N_{21}]][\Delta V^{PV}] \\ &\quad + [-[N_{22}]^{-1}[O_{21}]][\Delta a] \end{aligned} \quad (3.29)$$

นำสมการที่ (3.29) จัดรูปอย่างง่ายได้เป็นสมการที่ (3.30)

$$[\Delta V^{PQ}] = [D][\Delta P_i] + [E][\Delta V^{PV}] + [F][\Delta a] \quad (3.30)$$

เราสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของขนาดกำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีด ณ บัส เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญา ได้โดยอาศัยเมทริกซ์ความสัมพันธ์ ( $M$ ) ดังนี้

$$[\Delta P_i] = [M^T][\Delta T] \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.30) และ (3.31) เราจะสามารถประมาณค่าขนาดแรงดันที่โหลดบัลเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญา ขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง และการเปลี่ยนแปลงของแท็ปหม้อแปลงดังสมการที่ (3.32)

$$[\Delta V^{PQ}] = [D_T][M^T][\Delta T] + [E_V][\Delta V^{PV}] + [F_a][\Delta a] \quad (3.32)$$

### 3.3.3 การประมาณเชิงเส้นของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา [8]

ปัญหาขีดจำกัดของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การปลดโหลดในสัญญาซื้อขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาได้ แต่เราสามารถแก้ปัญหาโดยการปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปรับแท็ปหม้อแปลง โดยการประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญา การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของแท็ปหม้อแปลงได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาในส่วนของบัลควบคุมแรงดัน จากสมการที่ (3.24) แทนค่า  $\Delta V^{PQ}$  จากสมการที่ (3.29) ลงในสมการที่ (3.24) จะได้สมการที่ (3.33)

$$\begin{aligned} [\Delta Q_i^{PV}] = & [M_{11}] - [N_{12}][N_{22}]^{-1}[M_{21}][\Delta P_i] + [N_{12}][N_{22}]^{-1}[\Delta Q_i^{PQ}] \\ & + [[N_{11}] - [N_{12}][N_{22}]^{-1}[N_{21}]][\Delta V^{PV}] + [[O_{11}] - [N_{12}][N_{22}]^{-1}[O_{21}]][\Delta a] \end{aligned} \quad (3.33)$$

จากสมการความสัมพันธ์ที่ (3.28) นำมาแทนลงในสมการที่ (3.33) จะได้การประมาณค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญา การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของแท็ปหม้อแปลง ดังสมการที่ (3.34)

$$\begin{aligned} [\Delta Q_i^{PV}] = & [[M_{11}] - [N_{12}][N_{22}]^{-1}[M_{21}] + [N_{12}][N_{22}]^{-1}[0 \quad \alpha]][\Delta P_i] \\ & + [[N_{11}] - [N_{12}][N_{22}]^{-1}[N_{21}]][\Delta V^{PV}] + [[O_{11}] - [N_{12}][N_{22}]^{-1}[O_{21}]] \end{aligned} \quad (3.34)$$

ทำการจัดรูปอย่างง่ายของสมการที่ (3.34) จะได้สมการที่ (3.35)

$$[\Delta Q_i^{PV}] = [W][\Delta P_i] + [X][\Delta V^{PV}] + [Z][\Delta a] \quad (3.35)$$

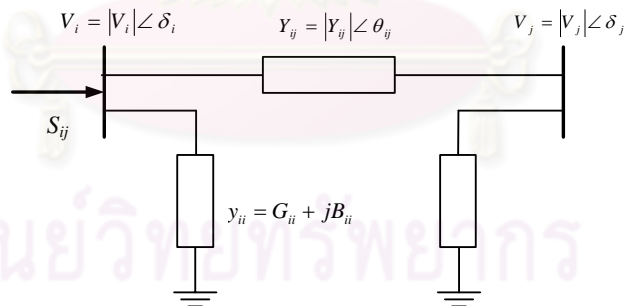
และจากสมการความสัมพันธ์ที่ (3.31) แทนลงในสมการที่ (3.33) จะได้สมการการประมาณค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังสมการที่ (3.36)

$$[\Delta Q_i^{PV}] = [W_T][M^T][\Delta T] + [X_V][\Delta V^{PV}] + [Z_a][\Delta a] \quad (3.36)$$

### 3.3.4 การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา [8]

สำหรับการประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง จะพิจารณาเฉพาะผลจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญา แต่จะไม่คำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของแท็ปหม้อแปลง เนื่องจากการปรับขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปรับแท็ปหม้อแปลงนั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญา ซึ่งจะแสดงให้เห็นเพิ่มเติมในบทที่ 4 ต่อไป

จากการพิจารณาค่าขีดจำกัดของสายส่ง เราจะอาศัยการประมาณค่าเชิงเส้นเพื่อคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาเกิดการเปลี่ยนแปลง การประมาณเชิงเส้นจะเริ่มจากการหาขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง โดยใช้วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง โดยใช้วงจรสมมูลแบบ  $\pi$

$$S_{ij} = \sqrt{p_{ij}^2 + q_{ij}^2} \quad (3.37)$$

$$p_{ij} = |V_i|^2 |y_{ij}| \cos \theta_{ij} + G_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.38)$$

$$q_{ij} = -|V_i|^2 |y_{ij}| \sin \theta_{ij} - B_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.39)$$

โดยที่  $S_{ij}$  คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่ง  $i - j$   
 $p_{ij}, q_{ij}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังเสมือนที่ไหลในสายส่ง  $i - j$   
 $|V_i|, |V_j|$  คือ ขนาดของแรงดันที่บัส  $i$  และ  $j$   
 $\delta_i, \delta_j$  คือ มุมของแรงดันที่บัส  $i$  และ  $j$   
 $|y_{ij}|, \theta_{ij}$  คือ ขนาดและมุมของแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง  $i - j$

เราสามารถประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่ง  $i - j$  เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญาได้จาก

$$[\Delta S_{ij}] = \left[ \frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta} \right] [\Delta \delta] + \left[ \frac{\partial S_{ij}}{\partial |V|} \right] [\Delta |V|] \quad (3.40)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial S_{ij}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta_i} &= \frac{1}{S_{ij}} \left( p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_i} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_i} \right) \\ \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_i} &= |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_i} &= -|V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta_j} &= \frac{1}{S_{ij}} \left( p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_j} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_j} \right) \\ \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_j} &= -|V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_j} &= |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \frac{\partial S_{ij}}{\partial |V_i|} &= \frac{1}{S_{ij}} \left( p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_i|} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_i|} \right) \\ \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_i|} &= 2|V_i| (|y_{ij}| \cos \theta_{ij} + G_{ii}) - |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_i|} &= -2|V_i| (|y_{ij}| \sin \theta_{ij} + B_{ii}) - |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \frac{\partial S_{ij}}{\partial |V_j|} &= \frac{1}{S_{ij}} \left( p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_j|} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_j|} \right) \\ \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_j|} &= -|V_i| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_j|} &= -|V_i| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{aligned}$$

จากการจัดรูปจาโคเบียนในสมการที่ (2.14) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดและมุมของแรงดันในรูปของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการ (3.42)

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

จากสมการที่ (3.4), (3.41) และ (3.42) เราจะสามารถประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง  $i - j$  เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญาตั้ง (3.43)

$$[\Delta S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial S_{ij}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M^T \\ [\alpha]M^T \end{bmatrix} [\Delta T] \quad (3.43)$$

เราสามารถจัดรูปสมการที่ (3.43) เป็นสมการอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (3.44)

$$[\Delta S_{ij}] = [K_T][\Delta T] \quad (3.44)$$

### 3.3.5 การประมาณเชิงเส้นของดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่มีผลจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา [7]

ดัชนีที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพทางแรงดันของระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายชนิดซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบและการใช้งาน หนึ่งในดัชนีที่มีความแม่นยำสูงและสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วคือดัชนี PQVSI [4] ซึ่งใช้แนวคิดในการหาเสถียรภาพทางแรงดันของระบบจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแบบ  $\pi$  โดยเราสามารถหาค่าของดัชนี PQVSI ได้จากสมการที่ (3.45) และ (3.46)

$$PQVSI = \lambda = \frac{P_{ji}^o}{P_{ji}^{NP}} \quad (3.45)$$

$$P_{ji}^{NP} = \frac{|V_i|^2}{2[Im\{AB^*\}tan\beta_{ji} - Re\{AB^*\} + |A||B|sec\beta_{ji}]} \quad (3.46)$$

โดย	$P_{ji}^o$	คือ	ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัสด้านรับ
	$P_{ji}^{NP}$	คือ	ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงคาดหวังที่จุดพังทลายทางแรงดันที่ไหลออกจากบัสด้านรับ
	$ V_i $	คือ	ขนาดแรงดันไฟฟ้าของบัสต้นทาง
	$\beta_{ji}$	คือ	มุมกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลออกจากบัสด้านรับ
	$A$	คือ	พารามิเตอร์ของสายส่งมีค่าเท่ากับ $1 + ZY_C$

$B$	คือ	พารามิเตอร์ของสายส่งมีค่าเท่ากับ $Z$
$Z$	คือ	ความต้านทานอนุกรมของสายส่ง
$Y_C$	คือ	ความต้านทานขนานของสายส่ง

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในสมการที่ (3.47), (3.48) และ (3.49) เราสามารถทำการประมาณเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3.50) และ (3.51)

อย่างไรก็ดี ในการประมาณเชิงเส้นของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน จะพิจารณาเฉพาะผลจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญาเท่านั้น จะไม่พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของแท็ปหม้อแปลง เนื่องจากการปรับขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปรับแท็ปหม้อแปลงนั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันน้อยมาก เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไฟฟ้าของคู่สัญญา ซึ่งจะแสดงให้เห็นเพิ่มเติมในบทที่ 4 ต่อไป

$$P_{ij} = |V_i|^2 |y_{ij}| \cos \theta_{ij} + G_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.47)$$

$$Q_{ij} = -|V_i|^2 |y_{ij}| \sin \theta_{ij} - B_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.48)$$

$$\tan \beta_{ij} = Q_{ij}/P_{ij} \quad (3.49)$$

$$[\Delta P_{ij}] = \left[ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} \quad \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V|} \right] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$\sec^2(\beta_{ij}) [\Delta \beta_{ij}] = \left[ \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial \delta} \quad \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial |V|} \right] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} \right] &= |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \left[ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} \right] &= -|V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \left[ \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_i|} \right] &= 2|V_i| |y_{ij}| \cos \theta_{ij} - 2G_{ii} |V_i| - |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ \left[ \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_j|} \right] &= -|V_i| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
\left[ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} \right] &= -|V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\
\left[ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} \right] &= |V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\
\left[ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_i|} \right] &= -2|V_i||y_{ij}| \sin \theta_{ij} - 2B_{ii}|V_i| - |V_j||y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\
\left[ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_j|} \right] &= -|V_i||y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\
\left[ \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial \delta_i} \right] &= \frac{P_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} - Q_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i}}{P_{ij}^2} \\
\left[ \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial \delta_j} \right] &= \frac{P_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} - Q_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j}}{P_{ij}^2} \\
\left[ \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial |V_i|} \right] &= \frac{P_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_i|} - Q_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_i|}}{P_{ij}^2} \\
\left[ \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial |V_j|} \right] &= \frac{P_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_j|} - Q_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_j|}}{P_{ij}^2}
\end{aligned}$$

ในการพิจารณาการปลดโหลดนั้น เราจะสมมุติว่าค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดที่ปลดนั้นมีค่าตัวประกอบกำลังคงที่

$$[\Delta Q_i] = [\alpha][\Delta P_i] \quad (3.52)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.42) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_a & J_b \\ J_c & J_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.52) และ (3.53) สามารถจัดรูปสมการที่ (3.50) และ (3.51) ได้เป็น

$$[\Delta P_{ij}] = [JPa] + \alpha[J Pb][\Delta P] \quad (3.54)$$

$$[\Delta\beta_{ij}] = [J\beta a] + \alpha[J\beta b][\Delta P] \quad (3.55)$$

โดยที่

$$[JP] = [JP a \quad JP b] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_a & J_b \\ J_c & J_d \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$[J\beta] = [J\beta a \quad J\beta b] = \frac{1}{\sec^2(\beta_{ij})} \begin{bmatrix} \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial \delta} & \frac{\partial(Q_{ij}/P_{ij})}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_a & J_b \\ J_c & J_d \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

จากสมการที่ (3.45) ทำการประมาณเชิงเส้นได้เป็น

$$[\Delta\lambda] = \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial P_{ji}} \right] [\Delta P_{ji}] + \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial \beta_{ji}} \right] [\Delta \beta_{ji}] + \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial |V_i|} \right] [\Delta |V_i|] \quad (3.58)$$

โดยที่

$$\left[ \frac{\partial \lambda}{\partial P_{ji}} \right] = \frac{2[\text{Im}\{AB^*\}\tan\beta_{ji} - \text{Re}\{AB^*\}] + |A||B|\sec\beta_{ji}}{|V_i|^2}$$

$$\left[ \frac{\partial \lambda}{\partial \beta_{ji}} \right] = \frac{2P_{ji} \left[ \text{Im}\{AB^*\}\sec^2\beta_{ji} + |A||B|\frac{\sin\beta_{ji}}{\cos^2\beta_{ji}} \right]}{|V_i|^2}$$

$$\left[ \frac{\partial \lambda}{\partial |V_i|} \right] = \frac{-4P_{ji}[\text{Im}\{AB^*\}\tan\beta_{ji} - \text{Re}\{AB^*\}] + |A||B|\sec\beta_{ji}}{|V_i|^3}$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.52) และ (3.53) สามารถเขียน  $\Delta|V_i|$  ได้เป็น

$$[\Delta|V_i|] = [J_c] + \alpha[J_d][\Delta P] \quad (3.59)$$

แทนค่าสมการที่ (3.54), (3.55) และ (3.59) ลงในสมการที่ (3.58) จะได้

$$[\Delta\lambda] = [J\lambda][\Delta P] \quad (3.58)$$

โดยที่

$$[J\lambda] = \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial P_{ji}} \right] [JP a] + \alpha [JP b] + \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial \beta_{ji}} \right] [J\beta a] + \alpha [J\beta b] + \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial |V_i|} \right] [J_c] + \alpha [J_d] \quad (3.59)$$

และจากความสัมพันธ์สมการที่ (3.4) สามารถเขียนสมการที่ (3.58) ได้ใหม่เป็น

$$[\Delta\lambda] = [J\lambda][M^T][\Delta T] \quad (3.60)$$

$$[\Delta\lambda] = [L_T][\Delta T] \quad (3.61)$$

### 3.3.6 การจัดรูปของการประมาณเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหาค่าขีดสุด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเหตุขัดข้องในระบบเนื่องจากการละเมิดขีดจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง 4 ขีดจำกัดคือ ขีดจำกัดของสายส่ง ขีดจำกัดของแรงดัน ขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขีดจำกัดดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน ซึ่งขีดจำกัดทั้ง 4 ได้ถูกทำการประมาณเชิงเส้นดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น และสามารถนำมาจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายสำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหาค่าขีดสุดได้ดังนี้

จากสมการที่ (3.32), (3.36), (3.44) และ (3.61) จะได้ว่า

$$[\Delta S_{ij}] = [K_T][\Delta T] \quad (3.62)$$

$$[\Delta V^{PQ}] = [D_T][M^T][\Delta T] + [E_V][\Delta V^{PV}] + [F_a][\Delta a]$$

$$[\Delta V^{PQ}] = [G_T][\Delta T] + [G_V][\Delta V^{PV}] + [G_a][\Delta a] \quad (3.63)$$

$$[\Delta Q_i^{PV}] = [W_T][M^T][\Delta T] + [X_V][\Delta V^{PV}] + [Z_a][\Delta a]$$

$$[\Delta Q_i^{PV}] = [H_T][\Delta T] + [H_V][\Delta V^{PV}] + [H_a][\Delta a] \quad (3.64)$$

$$[\Delta\lambda] = [L_T][\Delta T] \quad (3.65)$$

โดยที่	$K_T$ ,	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ
	$G_T, G_V, G_a$	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันที่บัสกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ
	$H_T, H_V, H_a$	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ

$L_T$  คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ที่แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ

### 3.4 การแก้ปัญหาความแออัดของสายส่งในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาโดยใช้ฟังก์ชันในการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้น

โดยทั่วไปปัญหาการปลดโหลด การปรับแรงดันที่บัส และการปรับหม้อแปลง นั้นมักจะถูกนำมาพิจารณาในสถานการณ์ฉุกเฉินเนื่องจากการเกิดเหตุขัดข้องขึ้นในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปลดโหลดบางส่วนในระบบออกหรือการปรับแรงดันที่บัสหรือปรับแก้หม้อแปลงไปเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบโดยรวมเอาไว้ เครื่องมือที่ใช้ในการปลดโหลด การปรับแรงดันที่บัสและปรับแก้หม้อแปลงนั้นจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพในการหาจำนวนโหลดที่ควรปลด แรงดันที่ควรปรับ และหม้อแปลงที่ควรปรับให้น้อยที่สุดโดยที่ยังสามารถทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพดังเดิมได้ และเนื่องจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น การแปลงฟังก์ชันจากแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้มาเป็นฟังก์ชันแบบเป็นเชิงเส้นโดยวิธีการประมาณเชิงเส้นจะช่วยให้การแก้ปัญหาการปลดโหลด การปรับแรงดัน และการปรับแก้หม้อแปลงสามารถทำได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น ฟังก์ชันรูปแบบในการแก้ปัญหาการปลดโหลด การปรับแรงดัน และการปรับหม้อแปลงสามารถเขียนได้ตามสมการดังนี้

$$\text{Min } z = c_T \times \Delta T + w_v (\Delta V^{PV})^2 + w_a (\Delta a)^2 \quad (3.66)$$

$$\text{s.t.} \quad \Delta S \leq \Delta S^{\max} \quad (3.67)$$

$$\Delta V_{\min}^{PQ} \leq \Delta V^{PQ} \leq \Delta V_{\max}^{PQ} \quad (3.68)$$

$$\Delta Q_{\min}^{PV} \leq \Delta Q^{PV} \leq \Delta Q_{\max}^{PV} \quad (3.69)$$

$$\Delta \lambda \leq \Delta \lambda^{\max} \quad (3.70)$$

$$\Delta a^{\min} \leq \Delta a \leq \Delta a^{\max} \quad (3.71)$$

$$\Delta V_{\min}^{PV} \leq \Delta V^{PV} \leq \Delta V_{\max}^{PV} \quad (3.72)$$

$$0 \leq \Delta T \leq T^{\max} \quad (3.73)$$

โดย  $c_T$  คือ ผลกระทบของการปลดโหลด  
 $w_v$  คือ ค่าคงที่ของการปรับแรงดัน ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่า  $c_T$  มาก  
 $w_a$  คือ ค่าคงที่ของการปรับแก้หม้อแปลง ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่า  $c_T$  มาก

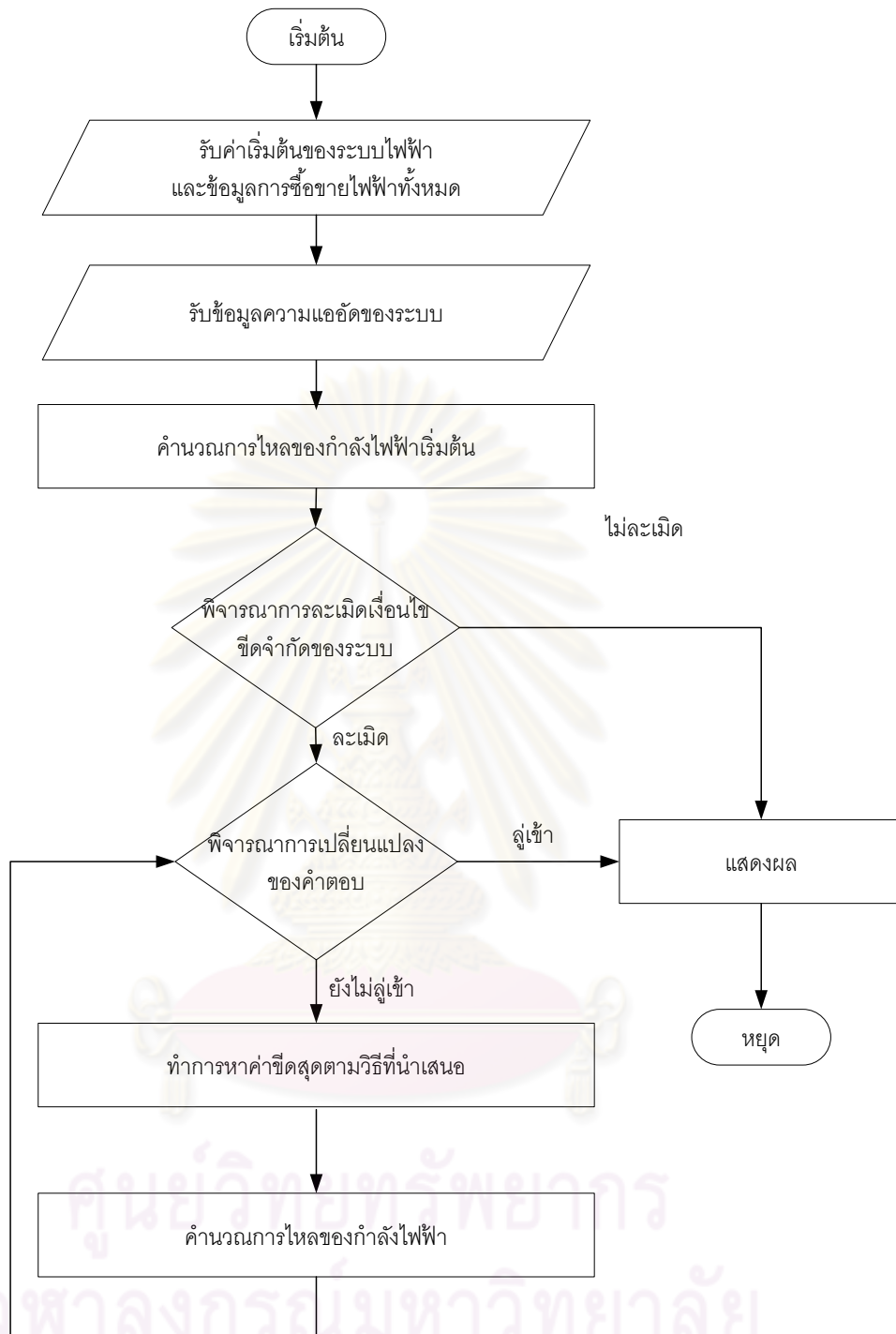
$\Delta T$	คือ	ปริมาณการปลดสัญญาซื้อขายไฟฟ้าออก ( $MW$ )
$\Delta V^{PV}$	คือ	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\Delta a$	คือ	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแท็ปหม้อแปลง
$\Delta S$ ,	คือ	ปริมาณที่ต้องการของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเพื่อลดปัญหาการเกินขีดจำกัดของสายส่ง
$\Delta V^{PQ}$	คือ	ปริมาณที่ต้องการของแรงดันที่โหลดบัสเพื่อช่วยลดปัญหาการเกินขีดจำกัดของแรงดันที่โหลดบัส
$\Delta Q^{PV}$	คือ	ปริมาณที่ต้องการของกำลังรีแอกทีฟเพื่อช่วยลดปัญหาการเกินขีดจำกัดของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\Delta \lambda$	คือ	ปริมาณที่ต้องการของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเพื่อลดปัญหาการเกินขีดจำกัดของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการปรับแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแท็ปหม้อแปลงก่อนการปลดโหลดในคู่สัญญา เพื่อให้เกิดการปลดโหลดในคู่สัญญาน้อยที่สุด เพราะฉะนั้นจึงทำการกำหนดค่าของผลกระทบของการปลดโหลด ให้มีค่ามากกว่าค่าคงที่ของการปรับแรงดันและค่าคงที่ของการปรับแท็ปหม้อแปลงไว้มากในระดับที่มีนัยสำคัญ

การประมาณเชิงเส้นนั้นจะมีความถูกต้องแม่นยำมากก็ต่อเมื่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าไม่มากจนเกินไป ดังนั้นในโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยการแก้ปัญหการปลดโหลด การปรับแรงดันที่บัสควบคุมแรงดัน และการปรับหม้อแปลงตามกระบวนการ *Quadratic Programming* ข้างต้นและทำซ้ำจนกระทั่งคำตอบมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

### 3.5 ขั้นตอนการแก้ปัญหาค่าความแออัดในระบบส่ง ที่มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

วิธีการที่นำเสนอการแก้ปัญหาค่าความแออัดในสายส่งด้วยวิธีการปลดโหลด การปรับแรงดันที่บัสควบคุมแรงดัน และการปรับแท็ปหม้อแปลงในระบบที่มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา จะเริ่มจากขั้นตอนการรับข้อมูลของระบบที่มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาพร้อมกับข้อมูลความสำคัญของโหลด จากนั้นจะทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อพิจารณาว่าระบบเกิดปัญหาของสายส่งหรือไม่ หากมีจะทำการปลดโหลด ปรับแรงดัน หรือปรับแท็ปหม้อแปลงให้มีความเหมาะสมที่สุดตามสมการที่ (3.67) ขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการแก้ปัญหาความแออัด



## บทที่ 4

### การทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทนี้จะ นำเสนอผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลของการแก้ไขความแออัดในระบบส่ง ภายใต้โครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาด้วยวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วย การปลดโหลดในคู่สัญญาในระบบที่มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา การปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ร่วมกับการปรับแท็ปหม้อแปลง โดยจะทำการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE RTS-79

ผลการทดสอบในบทนี้ประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ระดับแรงดันที่บัส และดัชนีเสถียรภาพเชิงแรงดัน PQVSI ที่มีต่อการปรับพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ (2) การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความไวด้วยการประมาณเชิงเส้นที่นำเสนอกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยตรง และ (3) ตัวอย่างผลการทดสอบการแก้ไขความแออัดในระบบส่งภายใต้โครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาด้วยวิธีการที่นำเสนอ

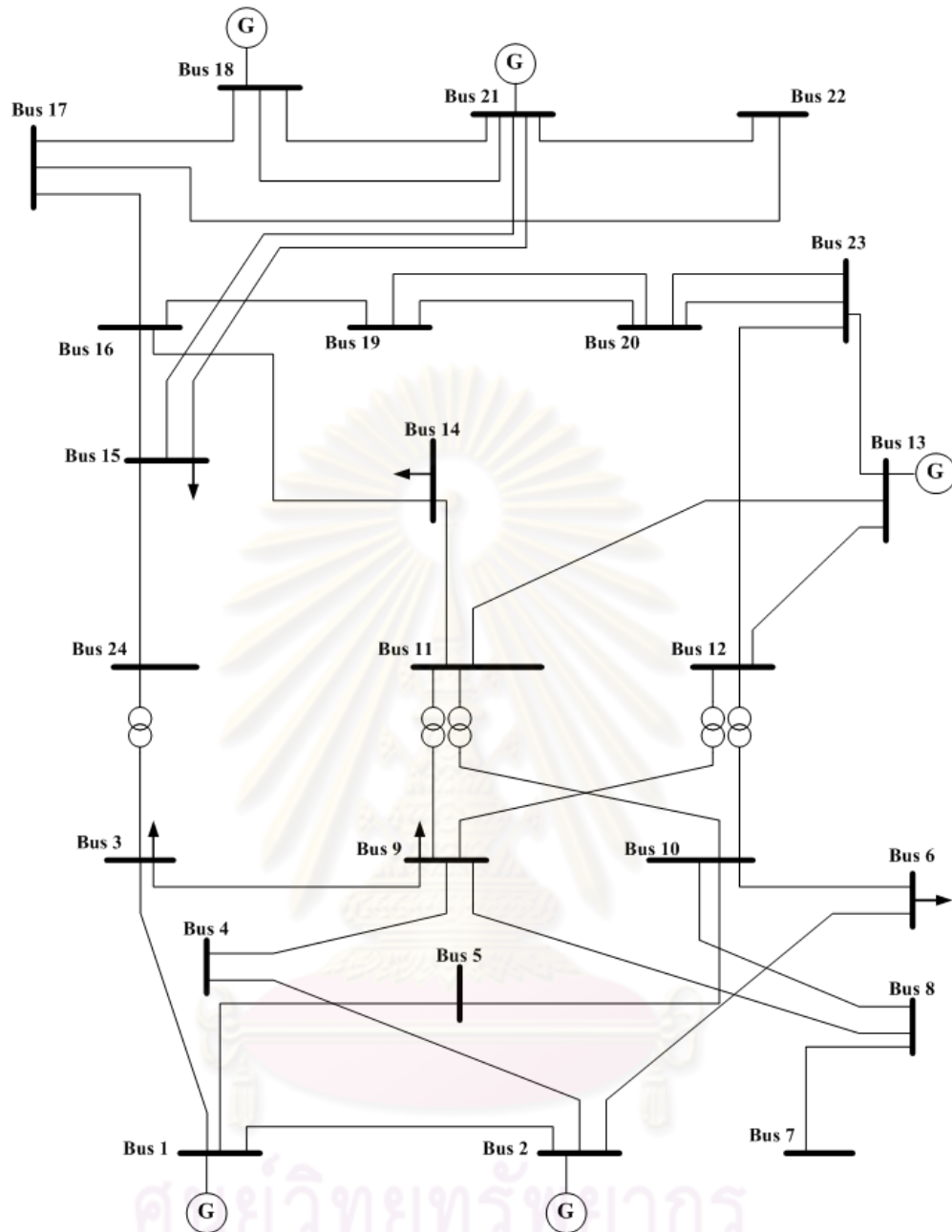
การทดสอบวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยโปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

#### 4.1 ระบบทดสอบ

ในการทดสอบเราจะใช้ระบบทดสอบ IEEE RTS-79 ดังรูปที่ 4.1 โดยระบบทดสอบ IEEE-RTS 79 ประกอบไปด้วยบัสจำนวน 24 บัส สายส่งจำนวน 38 สาย หม้อแปลงจำนวน 5 เครื่อง รายละเอียดของข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ในการทดสอบจะกำหนดให้บัส 13 เป็นบัสอ้างอิง และกำหนดให้มีความต้องการในการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา (Bilateral Contracts) ณ ช่วงเวลาที่สนใจประกอบไปด้วยคู่สัญญาจำนวน 5 คู่สัญญา บัสที่ทำการขายไฟฟ้า บัสที่ทำการซื้อไฟฟ้า และปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในแต่ละคู่สัญญา แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

สัญญาซื้อขายไฟฟ้าที่	บัสที่ขายไฟฟ้า	บัสที่ซื้อไฟฟ้า	ปริมาณการซื้อขายไฟฟ้า (MW)
1	1	3	200
2	2	6	260
3	13	9	400
4	18	14	400
5	21	15	500

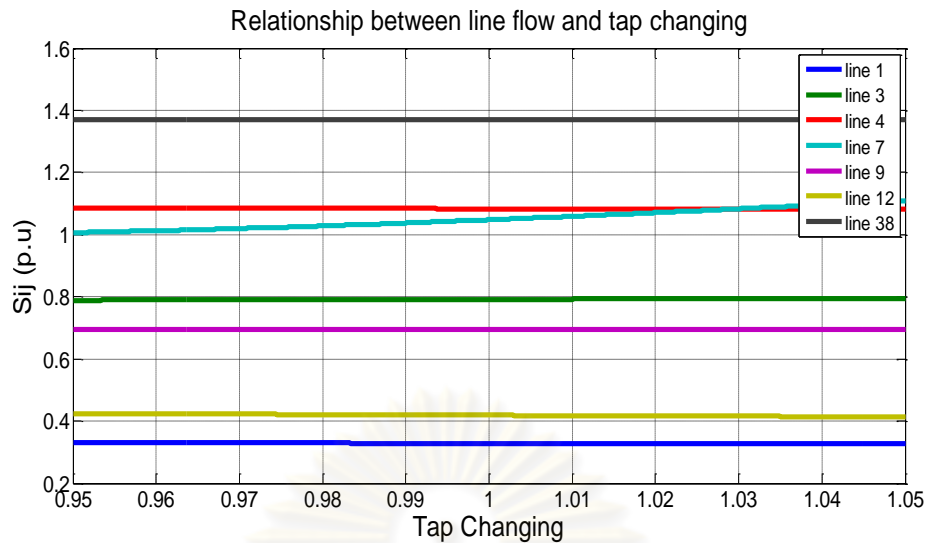


รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบ IEEE-RTS 79

#### 4.2 การวิเคราะห์ความไวที่มีต่อการปรับพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ

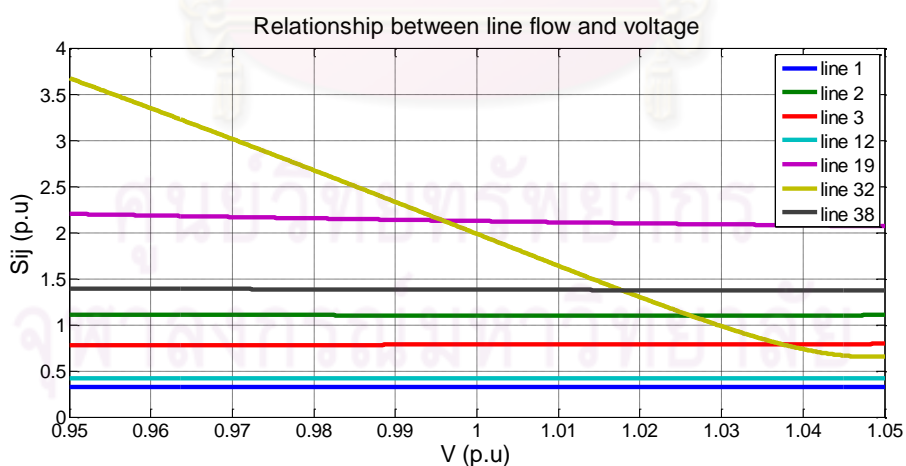
##### 4.2.1 ความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่มีต่อการปรับแก้ปห้มแปลงและแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการแก้ไขความแออัดที่เกิดขึ้นในระบบส่ง เมื่อพิจารณาถึงการปรับแก้ปห้มแปลงและปรับแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จะพบว่า การปรับแก้ปห้มแปลงและปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งน้อยมาก ผลดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง  
กับอัตราส่วนการปรับแท็ปหม้อแปลง

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกับอัตราส่วนการปรับแท็ปหม้อแปลง โดยในที่นี้ทำการปรับแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 1 ซึ่งเชื่อมอยู่ระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 24 เมื่อทำการปรับอัตราส่วนหม้อแปลงเพิ่มขึ้น แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น พบว่าสายส่งเส้นที่ 7 มีการเชื่อมต่ออยู่กับบัส 3 ที่มีหม้อแปลงนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระดับหนึ่ง ส่วนสายส่งอื่นๆ ที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับบัสที่มีหม้อแปลงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าน้อยมาก



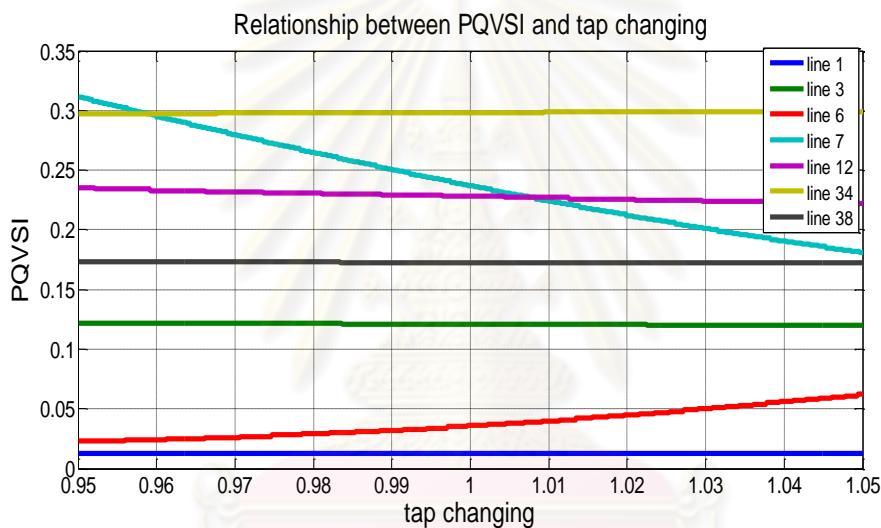
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง  
กับการปรับแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกับระดับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในที่นี้ทำการปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 4 ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 18 เมื่อทำการปรับระดับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แล้วสังเกตการ

เปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น จะพบว่าสายส่งเส้นที่ 32 ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 18 กับบัสที่ 21 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้ามาก ส่วนสายส่งเส้นอื่นๆ ที่ไม่ได้เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าน้อยมาก

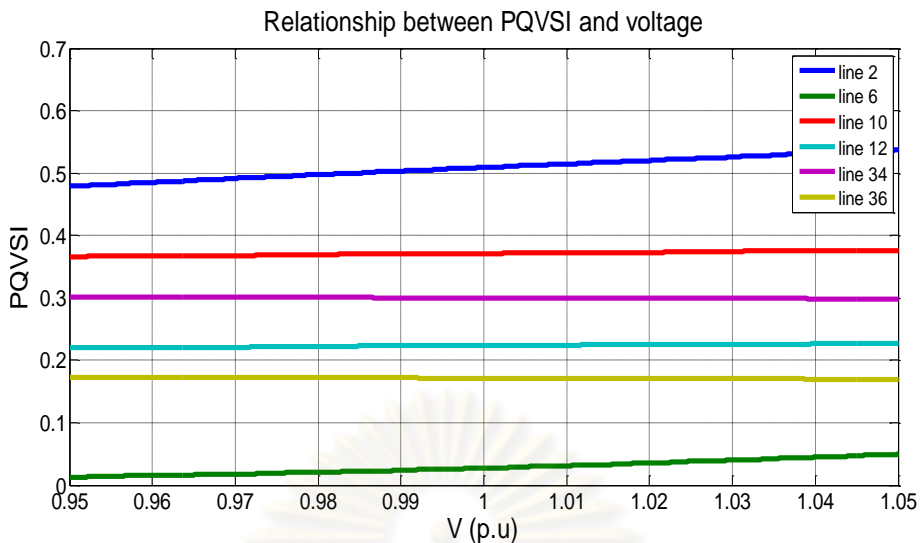
#### 4.2.2 ความไวของดัชนีเสถียรภาพเชิงแรงดันที่มีต่อการปรับแท็ปหม้อแปลงและแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการแก้ไขความแออัดที่เกิดขึ้นในระบบส่ง เมื่อพิจารณาถึงการปรับแท็ปหม้อแปลงและปรับแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จะพบว่า การปรับแท็ปหม้อแปลงและปรับแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันน้อยมาก ผลดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับอัตราส่วนการปรับแท็ปหม้อแปลง

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับอัตราส่วนการปรับแท็ปหม้อแปลง โดยในที่นี้ทำการปรับแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 1 ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 24 เมื่อทำการปรับอัตราส่วนหม้อแปลงเพิ่มขึ้น แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของแต่ละสายส่ง จะพบว่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันที่พิจารณาจากสายส่งเส้นที่ 6 ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 9 กับดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของสายส่งเส้นที่ 7 ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 24 นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันในระดับหนึ่ง ส่วนดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของสายส่งเส้นอื่นๆ ที่ไม่ได้ติดต่อกับบัสที่มีหม้อแปลงนั้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันน้อยมาก



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับการปรับแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในที่นี้ทำการปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 เมื่อทำการปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้น แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของแต่ละสายส่ง พบว่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันที่พิจารณาจากสายส่งเส้นที่ 2 ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 1 กับบัสที่ 3 และดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของสายส่งเส้นที่ 6 ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 9 นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันในระดับหนึ่ง ส่วนดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันของสายส่งเส้นอื่นๆ ที่ไม่ได้ติดต่อกับบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันน้อยมาก

#### 4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความไวด้วยการประมาณเชิงเส้นที่นำเสนอกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยตรง

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาความแออัดในระบบส่งในตลาดการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา นั่น โดยอาศัยการประมาณเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหาค่าขีดสุดดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.4 ในหัวข้อนี้ จะแสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องจากการประมาณเชิงเส้นที่นำเสนอ กับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแล้วทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยตรง ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการประมาณจะถูกรวบรวมด้วยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยแบบ RMSE (Root mean square error) ดังสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2

$$\varepsilon_i = \left( \frac{x_i^{actual} - x_i^{forecast}}{x_i^{actual}} \right) \times 100 \% \quad (4.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i)^2} \quad (4.2)$$

โดยที่	$\varepsilon_i$	คือ	ค่าความผิดพลาดของการเปลี่ยนแปลง
	$RMSE$	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยแบบ RMSE
	$x_i^{actual}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์
	$x_i^{forecast}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้น
	$n$	คือ	จำนวนข้อมูล

#### 4.3.1 การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์) ( $\varepsilon_i$ )
	ระบบเดิม	ระบบ ที่ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.296921	0.297033	0.000112	0.000112	0.2178%
2	1.128431	1.128537	0.000106	0.000106	-0.0011%
3	1.067002	1.067233	0.000231	0.000231	0.0045%
4	1.143578	1.143718	0.000141	0.000141	-0.0010%
5	1.332217	1.332659	0.000442	0.000442	0.0069%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาในสายส่งเส้นอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.



จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.0016% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งด้วยวิธีการที่นำเสนอมีค่าน้อยมาก ซึ่งแสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญานั้นมีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาค่าขีดสุดได้

#### 4.3.2 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951435	-0.000006	-0.000006	0.0109%
4	0.987588	0.987581	-0.000008	-0.000008	0.0107%
5	1.022219	1.022206	-0.000013	-0.000013	0.0142%
6	0.965039	0.964988	-0.000050	-0.000050	0.0126%
7	0.991748	0.991732	-0.000016	-0.000016	0.0141%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาในคู่สัญญาอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.00014% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่โหลดบัสด้วย

วิธีการที่นำเสนอมีค่าที่น้อยมาก แสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่มีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหา ค่าขีดสุดได้

#### 4.3.3 การประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.084495	0.000212	0.000212	0.0146%
2	0.041986	0.042216	0.000230	0.000230	0.0274%
18	0.649059	0.649112	0.000053	0.000053	0.0139%
21	1.659453	1.659521	0.000068	0.000068	0.0150%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาในคู่สัญญาอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.00019% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญานั้นมีค่าที่น้อยมาก แสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญานั้นมีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาค่าขีดสุดได้

#### 4.3.4 การประมาณเชิงเส้นของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบ ที่ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.013214	0.013218	0.000004	0.000004	0.1895%
2	0.538988	0.539027	0.000039	0.000038	1.1761%
3	0.181694	0.181758	0.000064	0.000063	1.0301%
4	0.341125	0.341167	0.000042	0.000041	0.9778%
5	0.538036	0.538226	0.000191	0.000189	0.5679%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาในคู่สัญญาอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.0280% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญานั้นมีค่าน้อยมาก แสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญานั้นมีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหา ค่าขีดสุดได้

#### 4.3.5 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951796	0.000354	0.000354	0.0143%
4	0.987588	0.987693	0.000105	0.000105	0.0714%
5	1.022219	1.022874	0.000655	0.000655	0.0079%
6	0.965039	0.965270	0.000232	0.000232	0.0319%
7	0.991748	0.991974	0.000226	0.000226	0.0261%
8	0.991242	0.991468	0.000226	0.000226	0.0261%
9	0.960242	0.960417	0.000176	0.000176	0.0286%
10	1.013973	1.014245	0.000272	0.000272	0.0233%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.00022% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยมาก แสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาค่าขีดสุดได้

#### 4.3.6 การประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า巴士ที่ 1

巴士ที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบ ที่ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.003174	0.081533	0.081454	0.0969%
2	0.041986	-0.034643	-0.076629	-0.076629	0.0003%
18	0.649059	0.647981	-0.001078	-0.001078	-0.0005%
21	1.659453	1.657256	-0.002196	-0.002196	-0.0083%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่巴士 1 ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.00029% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยมาก แสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีความถูกต้องเหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาค่าขีดสุดได้

#### 4.3.7 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลง

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงเครื่องที่ 3

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบ ที่ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951560	0.000118	0.000118	-0.1615%
4	0.987588	0.987730	0.000142	0.000142	-0.1580%
5	1.022219	1.022214	-0.000005	-0.000005	0.6161%
6	0.965039	0.965030	-0.000008	-0.000008	0.6113%
7	0.991748	0.991874	0.000126	0.000126	-0.1883%
8	0.991242	0.991368	0.000126	0.000126	-0.1883%
9	0.960242	0.960504	0.000262	0.000262	-0.1568%
10	1.013973	1.013962	-0.000010	-0.000010	0.5975%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงในหม้อแปลงเครื่องอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงเครื่องที่ 3 ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.0035% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงนั้นมีค่าที่น้อยมาก แสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงนั้นมีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาค่าขีดสุดได้



#### 4.3.8 การประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลง

ตัวอย่างผลการประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3

ปีที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบ ที่ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
19	1.007722	1.007709	-0.000013	-0.000013	0.1187%
20	1.010513	1.010485	-0.000028	-0.000028	0.0254%
22	1.051527	1.051528	0.000001	0.000001	-0.5457%
23	1.010632	1.010596	-0.000036	-0.000036	0.0071%
24	0.969943	0.969994	0.000051	0.000051	-0.1774%

หมายเหตุ การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงเครื่องอื่นๆ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3 ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. เราสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.0034% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแท็ปหม้อแปลงนั้นมีค่าน้อยมาก แสดงว่าการประมาณเชิงเส้นของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแท็ปหม้อแปลงนั้นมีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาค่าขีดสุดได้

#### 4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบการแก้ไขความแออัดในระบบส่งภายใต้โครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาด้วยวิธีการที่นำเสนอ

ปัญหาความแออัดในระบบส่งขึ้นนั้นอาจเกิดจากหลายสาเหตุเช่น มีการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างต่อเนื่อง หรือมีสายส่งบางเส้นถูกปลดออกจากระบบ หรืออาจเกิดจากการชำรุดของอุปกรณ์

อื่นๆ ซึ่งส่งผลให้ระบบเกิดการละเมิดขีดจำกัดต่างๆ ขึ้นมา หากระบบดังกล่าวไม่ได้รับการปัญหาอย่างรวดเร็วและมีความเหมาะสม อาจส่งผลให้ทำงานผิดพลาด สูญเสียเสถียรภาพ ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ ทางควบคุมระบบ หรือ ISO จำเป็นต้องรีบแก้ไขปัญหานี้เพื่อให้ระบบกลับมาสู่สภาวะการทำงานที่ไม่มีการละเมิดขีดจำกัดต่างๆ โดยอาจทำการปรับกำลังการผลิต ปรับแท็ปของหม้อแปลง ปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัดโหลดบางส่วนในแต่ละสัญญา ออกจากระบบเพื่อให้ระบบโดยรวมสามารถคงอยู่ได้ อย่างไรก็ตาม สำหรับการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญานั้นเมื่อ ISO ทำการตัดโหลดออกแล้วจะต้องทำการสั่งปลดกำลังการผลิตของคู่สัญญานั้นในปริมาณที่เท่ากันด้วย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการแก้ไขปัญหาความแออัดในระบบส่งนี้โดย การปลดการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา ร่วมกับการปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการปรับแท็ปหม้อแปลงอย่างเหมาะสม ผลการทดสอบในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 สายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 12 กับบัสที่ 13 หลุดออกจากระบบส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางแรงดัน

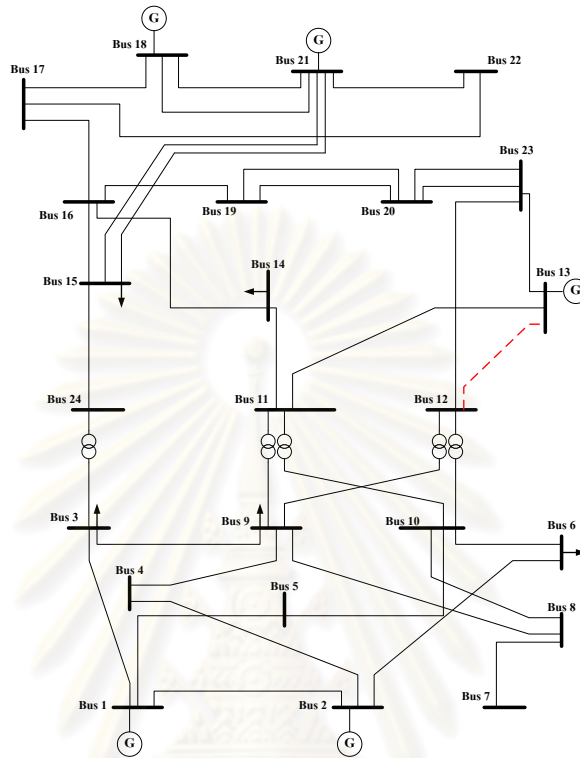
กรณีที่ 2 สายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 14 กับบัสที่ 16 หลุดออกจากระบบ ส่งผลให้เกิดการละเมิดการละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดัน และขีดจำกัดของสายส่ง

กรณีที่ 3 สายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 24 หลุดออกจากระบบ ส่งผลทำให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางแรงดัน และการละเมิดขีดจำกัดดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน

กรณีที่ 4 สายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 9 กับบัสที่ 12 และสายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 15 กับบัสที่ 24 หลุดออกจากระบบ ส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางแรงดัน การละเมิดขีดจำกัดของสายส่ง การละเมิดขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการละเมิดขีดจำกัดดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน

ซึ่งในการทดลองกรณีต่างๆ ได้มีการละเมิดขีดจำกัดทางด้านสายส่ง ขีดจำกัดทางด้านแรงดัน ขีดจำกัดทางด้านกำลังรีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นขีดจำกัดทางด้านดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งขีดจำกัดทางด้านสายส่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.3 ขีดจำกัดทางด้านกำลังรีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.2 ส่วนทางด้านขีดจำกัดทางแรงดันนั้นได้กำหนดค่าแรงดันต่ำสุดไม่เกิน 0.95 p.u. และค่าแรงดันสูงสุดไม่เกิน 1.05 p.u. และขีดจำกัดทางด้านดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันนั้นกำหนดไว้ที่ 0.7

**กรณีศึกษาที่ 1** สายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 12 กับบัสที่ 13 หลุดออกจากระบบ ดังรูปที่ 4.6 ส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดัน เมื่อประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอมาแก้ปัญหาความแออัดในระบบส่ง จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.6 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.10 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีศึกษาที่ 1

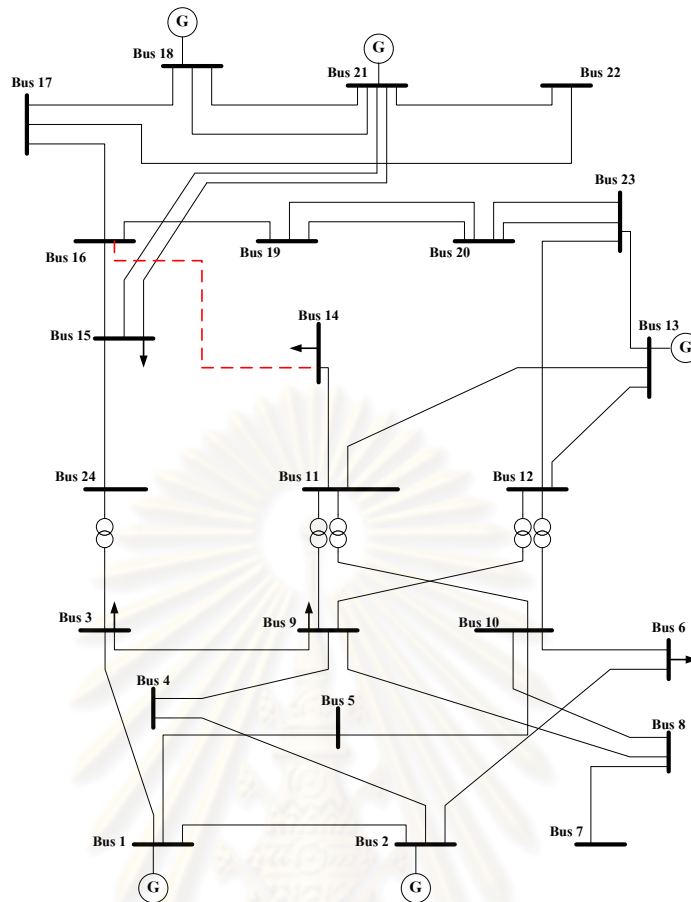
บัส	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
3	0.9417	0.9564
6	0.9490	0.9684
9	0.9404	0.9510
14	0.9373	0.9503
หม้อแปลง (บัสต้นทาง-บัสปลายทาง)	แท็บหม้อแปลงก่อนการ แก้ปัญหา (p.u.)	แท็บหม้อแปลงหลังการ แก้ปัญหา (p.u.)
1 (3-24)	1.0150	1.0167
2 (9-11)	1.0300	1.0049
3 (9-12)	1.0300	1.0321
4 (10-11)	1.0150	0.9895
5 (10-12)	1.0150	1.0192

ตารางที่ 4.10 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 1 (ต่อ)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
1	1.0350	1.0676
2	1.0350	1.0683
4	1.0500	1.0589
5	1.0500	1.0458
คู่สัญญา	ปริมาณสัญญา ก่อนการแก้ไข (MVA)	ปริมาณสัญญา หลังการแก้ไข (MVA) [ปริมาณที่ถูกตัดออก]
3 (13-9)	400	396.47 [3.53]
ปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าที่ถูกตัดรวม (MVA)		3.53

ในกรณีที่ 1 นี้ เมื่อสายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 12 กับบัสที่ 13 หลุดออกจากระบบ จะส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดัน โดยในที่นี้เป็นแรงดันตกที่บัสที่ 3 บัสที่ 6 บัสที่ 9 และบัสที่ 14 เมื่อผู้ควบคุมระบบได้ทำการแก้ไขปัญหาโดยการปรับแก้หม้อแปลง ปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และได้ทำการปลดโหลดของคู่สัญญาคู่ที่ 3 ในปริมาณ 3.53 MVA ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0.2006 ของปริมาณโหลดในคู่สัญญา เพียงคู่สัญญาเดียว จะทำให้ระบบกลับมามีแรงดันที่ไม่ละเมิดขีดจำกัด และจะสังเกตได้ว่าผู้ควบคุมระบบทำการปลดโหลดของคู่สัญญาเป็นปริมาณที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับการที่จะต้องปรับแก้หม้อแปลงหรือการปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

**กรณีที่ 2** สายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 14 กับบัสที่ 16 หลุดออกจากระบบ ดังรูปที่ 4.7 ส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดัน และการละเมิดขีดจำกัดของสายส่ง เมื่อประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอมาแก้ปัญหาคความแออัดในระบบส่ง จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.7 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีที่ 2

ตารางที่ 4.11 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 2

สายส่งเส้นที่ (บัสต้นทาง-บัสปลายทาง)	การใช้งานสายส่งไฟฟ้า ก่อนการแก้ไข (MVA) [ปริมาณที่เกินขีดจำกัด]	การใช้งานสายส่งไฟฟ้า หลังการแก้ไข (MVA)
18 (11-13)	404.9484 [54.9484]	329.6973
บัส	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
3	0.9358	0.9869
6	0.9329	0.9883
9	0.9216	0.9732
11	0.9062	0.9935
14	0.8176	0.9500
22	1.0531	1.0500

ตารางที่ 4.11 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 2 (ต่อ)

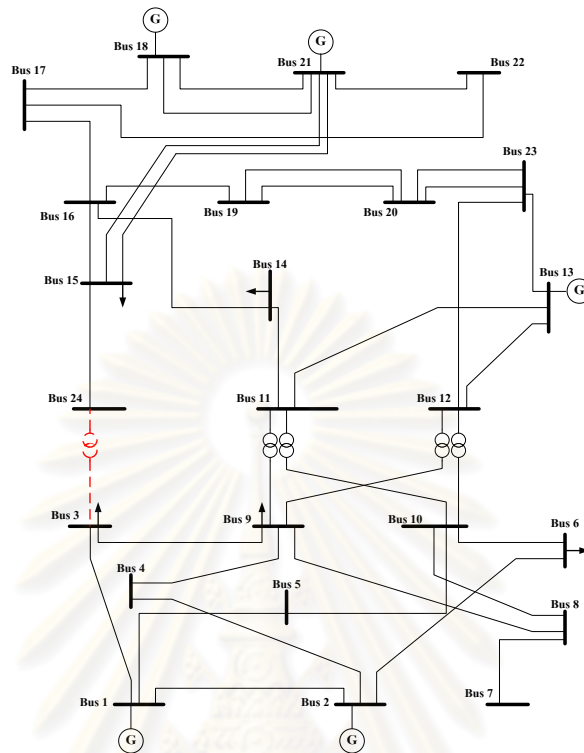
หม้อแปลง (บัสต้นทาง-บัสปลายทาง)	แท๊ปหม้อแปลงก่อนการ แก้ปัญหา (p.u.)	แท๊ปหม้อแปลงหลังการ แก้ปัญหา (p.u.)
1 (3-24)	1.0150	1.0657
2 (9-11)	1.0300	0.9785
3 (9-12)	1.0300	1.0815
4 (10-11)	1.0150	0.9643
5 (10-12)	1.0150	1.0657
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
1	1.0350	1.0768
2	1.0350	1.0829
4	1.0500	1.0588
5	1.0500	1.0417
คู่สัญญา	ปริมาณสัญญา ก่อนการแก้ปัญหา (MVA)	ปริมาณสัญญา หลังการแก้ปัญหา (MVA) [ปริมาณที่ถูกตัดออก]
4 (18-14)	400	264.93 [135.07]
ปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าที่ถูกตัดรวม (MVA)		135.07

ในกรณีที่ 2 นี้ เมื่อสายส่งเส้นที่เชื่อมต่อนระหว่างบัสที่ 14 กับบัสที่ 16 หลุดออกจากระบบ จะส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางแรงดันและการละเมิดขีดจำกัดของสายส่ง โดยในขณะนี้ จะละเมิดขีดจำกัดของสายส่งเส้นที่เชื่อมต่อนระหว่างบัสที่ 11 กับบัสที่ 13 โดยเกินขีดจำกัดทางด้านสายส่งเป็นจำนวน 54.95 MVA และละเมิดขีดจำกัดทางแรงดันโดยเป็นแรงดันตกที่บัสที่ 3 บัสที่ 6 บัสที่ 9 บัสที่ 11 บัสที่ 14 และบัสที่ 22 เมื่อผู้ควบคุมระบบได้ทำการแก้ปัญหานี้โดยการปรับแท๊ปหม้อแปลง ปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และได้ทำการปลดโหลดของคู่สัญญาคู่ที่ 4 ในปริมาณ 135.07 MVA ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 7.6744 ของปริมาณโหลดคู่สัญญา จะทำให้ระบบกลับมาทำงานได้เป็นปกติ

**กรณีที่ 3** หม้อแปลงที่เชื่อมต่อนระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 24 หลุดออกจากระบบดังรูปที่ 4.8 ส่งผลทำให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางแรงดัน และการละเมิดขีดจำกัดทางด้านดัชนีเสถียรภาพ



ทางแรงดัน เมื่อประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอมาแก้ปัญหาความแออัดในระบบส่ง จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.8 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีที่ 3

ตารางที่ 4.12 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 3

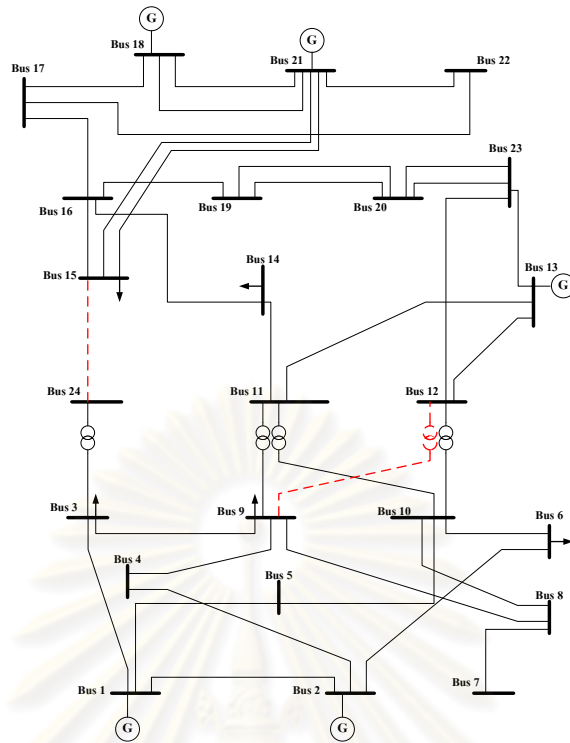
บัส	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
3	0.8750	0.9500
9	0.9384	0.9974
14	0.9436	0.9522
PQVSI	ค่าดัชนีก่อนการแก้ไข	ค่าดัชนีหลังการแก้ไข
	0.7415	0.6501
หม้อแปลง (บัสต้นทาง-บัสปลายทาง)	แท็ปหม้อแปลงก่อนการ แก้ปัญหา (p.u.)	แท็ปหม้อแปลงหลังการ แก้ปัญหา (p.u.)
2 (9-11)	1.0300	1.0815
3 (9-12)	1.0300	1.0815
4 (10-11)	1.0150	0.9817
5 (10-12)	1.0150	0.9820

ตารางที่ 4.12 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 3 (ต่อ)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
1	1.0350	1.0853
2	1.0350	1.0830
4	1.0500	1.0544
5	1.0500	1.0468
คู่สัญญา	ปริมาณสัญญา ก่อนการแก้ไข (MVA)	ปริมาณสัญญา หลังการแก้ไข (MVA) [ปริมาณที่ถูกตัดออก]
1 (1-3)	200	182.49 [17.51]
ปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าที่ถูกตัดรวม (MVA)		17.51

ในกรณีที่ 3 นี้ เมื่อหม้อแปลงที่เชื่อมต่อบetween บัสที่ 3 กับบัสที่ 24 หลุดออกจากระบบ จะส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดัน โดยในที่นี้เป็นแรงดันตกที่บัส 3 บัส 9 และบัส 14 และละเมิดขีดจำกัดทางเสถียรภาพทางแรงดันซึ่งมีดัชนี PQVSI เกินขีดจำกัดไป 0.0415 เมื่อผู้ควบคุมระบบได้ทำการแก้ไขปัญหาการละเมิดขีดจำกัดต่างๆ โดยการปรับแก้หม้อแปลง ปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และได้ทำการปลดโหลดของคู่สัญญาคู่ที่ 1 ปริมาณการปลด 17.51 MVA ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0.9949 ของปริมาณโหลดคู่สัญญา จะทำให้ระบบกลับมาทำงานได้เป็นปกติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผู้ควบคุมระบบพยายามทำการแก้ปัญหานี้โดยการปรับแก้หม้อแปลงและปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มากที่สุด และจะทำการปลดโหลดของคู่สัญญาในปริมาณที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

**กรณีที่ 4** หม้อแปลงที่เชื่อมต่อบetween บัสที่ 9 กับบัสที่ 12 และสายส่งเส้นที่เชื่อมต่อบetween บัสที่ 15 กับบัสที่ 24 หลุดออกจากระบบ ดังรูปที่ 4.9 ส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดทุกด้านที่พิจารณา คือการละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดัน การละเมิดขีดจำกัดทางด้านสายส่ง การละเมิดขีดจำกัดทางด้านกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการละเมิดขีดจำกัดทางด้านดัชนีเสถียรภาพแรงดัน เมื่อประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอมาแก้ปัญหาคือความแออัดในระบบส่ง จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.9 ระบบทดสอบเมื่อเกิดปัญหาสายหลุดกรณีที่ 4

ตารางที่ 4.13 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 4

สายส่งเส้นที่ (บัสต้นทาง-บัสปลายทาง)	การใช้งานสายส่งไฟฟ้า ก่อนการแก้ไข (MVA) [ปริมาณที่เกินขีดจำกัด]	การใช้งานสายส่งไฟฟ้า หลังการแก้ไข (MVA)
2 (1-3)	189.8333 [14.8333]	118.3247
18 (11-13)	353.0121 [3.0121]	322.0758
บัส	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
3	0.7988	0.9500
4	0.9202	1.0029
7	0.9205	0.9883
8	0.9201	0.9878
9	0.8456	0.9500
11	0.9310	0.9699
14	0.9194	0.9500
24	0.7870	0.9502

ตารางที่ 4.13 การละเมิดขีดจำกัดและการแก้ไขปัญหาในการทดลองกรณีที่ 4 (ต่อ)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	กำลังรีแอกทีฟ ก่อนการแก้ไข (MVA <sub>r</sub> )	กำลังรีแอกทีฟ หลังการแก้ไข (MVA <sub>r</sub> )
1	85.0268	-2.6571
PQVSI	ค่าดัชนีก่อนการแก้ไข	ค่าดัชนีหลังการแก้ไข
	0.8746	0.5891
หม้อแปลง (บัสต้นทาง-บัสปลายทาง)	เทปหม้อแปลงก่อนการ แก้ปัญหา (p.u.)	เทปหม้อแปลงหลังการ แก้ปัญหา (p.u.)
1 (3-24)	1.0150	0.9997
2 (9-11)	1.0300	1.0699
4 (10-11)	1.0150	0.9642
5 (10-12)	1.0150	1.0351
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	แรงดันก่อนการแก้ไข (p.u.)	แรงดันหลังการแก้ไข (p.u.)
1	1.0350	1.0734
2	1.0350	1.0793
4	1.0500	1.0590
5	1.0500	1.0449
คู่สัญญา	ปริมาณสัญญา ก่อนการแก้ปัญหา (MVA)	ปริมาณสัญญา หลังการแก้ปัญหา (MVA) [ปริมาณที่ถูกตัดออก]
1 (1-3)	200	103.26 [96.74]
3 (13-9)	400	391.37 [8.63]
4 (18-14)	400	381.15 [18.85]
ปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าที่ถูกตัดรวม (MVA)		124.22

ในกรณีที่ 4 นี้ เมื่อหม้อแปลงที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 9 กับบัสที่ 12 และสายส่งเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 15 กับที่ 24 หลุดออกจากระบบ จะส่งผลให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดของสายส่งเส้นที่ 2 และสายส่งเส้นที่ 18 โดยเกินขีดจำกัดทางด้านสายส่งเป็นจำนวน 14.8333 MVA และ 3.0121 MVA ตามลำดับ เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางแรงดันซึ่งในที่นี้เป็นแรงดันตกที่หลายตำแหน่งในระบบ เกิดการละเมิดขีดจำกัดทางด้านกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1

โดยเกินขีดจำกัดไป 5.0268 MVAr และเกิดการละเมิดขีดจำกัดดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน PQVSI ไป 0.1746 เมื่อผู้ควบคุมระบบได้ทำการแก้ปัญหาการละเมิดขีดจำกัดต่างๆ โดยการปรับแก้หม้อแปลง ปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และได้ทำการปลดโหลดของคู่สัญญาคู่ที่ 1 ปริมาณการปลด 96.74 MVA ปลดโหลดของคู่สัญญาคู่ที่ 3 ปริมาณการปลด 8.63 MVA และปลดโหลดของคู่สัญญาคู่ที่ 4 ปริมาณการปลด 18.85 MVA โดยระบบทำการปลดโหลดในคู่สัญญาารวมเป็นปริมาณ 124.22 MVA ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 7.0580 ของปริมาณโหลดคู่สัญญา จะทำให้ระบบทำงานได้ปกติโดยไม่ละเมิดขีดจำกัดต่างๆ ดังผลในตารางที่ 4.13

จากผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ระบบเกิดการละเมิดขีดจำกัดทางด้านสายส่ง ระบบจะมีการปลดโหลดของคู่สัญญาเป็นปริมาณมาก ส่วนกรณีที่ระบบละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดันหรือละเมิดขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบจะทำการปรับแก้หม้อแปลงและปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าการที่จะปลดโหลดของแต่ละคู่สัญญา แสดงว่าระบบที่มีการละเมิดขีดจำกัดต่างๆ ส่วนใหญ่จะถูกแก้ไขโดยการปรับแก้หม้อแปลงและปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อน แล้วค่อยมาปลดโหลดของคู่สัญญา แต่ถ้าระบบนั้นมีการละเมิดขีดจำกัดทางด้านสายส่งแล้ว ระบบจะมีการปลดโหลดของคู่สัญญาเป็นปริมาณมาก เพื่อให้ระบบกลับมาทำงานในสภาวะไม่ละเมิดขีดจำกัดต่างๆ และในที่นี้ผู้ควบคุมระบบหรือ ISO จะเป็นผู้รับผิดชอบในการแก้ปัญหาความแออัดของสายส่ง โดยเมื่อระบบเกิดปัญหาขึ้น ISO จะสั่งการปลดการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาออกบางส่วน ปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ควบคู่ไปกับการปรับแก้หม้อแปลง เพื่อที่จะทำให้ระบบกลับมาทำงานได้ตามปกติ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ วิธีการแก้ไขความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา ซึ่งปัญหาความแออัดในระบบส่งในที่นี้หมายถึง การที่อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งในระบบส่งทำงานในสถานะที่ละเมิดเงื่อนไขขีดจำกัดของระบบ เมื่อเกิดปัญหาความแออัดขึ้นในระบบส่ง หากระบบดังกล่าวไม่ได้รับการแก้ปัญหาอย่างรวดเร็วและมีความเหมาะสม อาจส่งผลให้ระบบทำงานผิดพลาด สูญเสียเสถียรภาพ ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ ในกรณีที่ระบบมีความผิดปกติเกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นความผิดปกติทางด้านสายส่งหรือความผิดปกติทางแรงดันนั้น ISO อาจทำการปรับกำลังการผลิต ปรับแท๊ปของหม้อแปลง ปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัดโหลดบางส่วนในแต่ละสัญญาออกจากระบบเพื่อให้ระบบโดยรวมสามารถคงอยู่ได้อย่างไรก็ตาม สำหรับการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญานั้นเมื่อ ISO ทำการตัดโหลดออกแล้วจะต้องทำการส่งปลดกำลังการผลิตของคู่สัญญานั้นในปริมาณที่เท่ากันด้วย สำหรับขีดจำกัดของระบบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาขีดจำกัดของระบบอันประกอบด้วย ขีดจำกัดของสายส่ง ขีดจำกัดทางด้านแรงดันของแต่ละบัส ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขีดจำกัดทางเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งขีดจำกัดนี้ได้ถูกทำให้อยู่ในรูปของการประมาณเชิงเส้นก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแก้ปัญหาขีดสุด โดยข้อดีของวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสรุปได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. ปรับปรุงรูปแบบของปัญหาค่าขีดสุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้กลายเป็นปัญหาแบบเชิงเส้นโดยวิธีการประมาณเชิงเส้นเพื่อลดเวลาในการแก้ปัญหาเพื่อให้ทันต่อความต้องการในสถานการณ์ฉุกเฉิน
2. วิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาซึ่งเป็นปัญหาที่ยังมีผู้วิจัยไม่มากนัก
3. วิธีการที่นำเสนอได้คำนึงถึงเงื่อนไขขีดจำกัดเสถียรภาพเชิงแรงดันไฟฟ้าด้วย

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการประมาณเชิงเส้นช่วยให้การแก้ปัญหาความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายแบบคู่สัญญาสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้อง รวมทั้งยังมีความเหมาะสมกับการใช้งานในทางปฏิบัติมากขึ้นอีกด้วย การแก้ปัญหาความแออัดของระบบส่งโดยพิจารณาการซื้อขายแบบคู่สัญญาด้วยวิธีการที่นำเสนอในทางปฏิบัตินั้นจะมีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้นถ้าหากผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ปัญหาในเบื้องต้นได้ว่า ระบบต้องการ



การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเพียงใดเพื่อกลับไปสู่สภาวะการทำงานปกติที่มีเสถียรภาพ การวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้นที่ดีจะช่วยให้ผู้ควบคุมระบบสามารถเลือกจำนวนครั้งในการประมาณเชิงเส้นได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมซึ่งจะช่วยให้การแก้ปัญหาการปลดโหลดทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

1. ในทางปฏิบัติผู้ใช้งานสามารถนำหลักการไปพัฒนาโปรแกรมคำนวณแผนการปลดโหลดอย่างอัตโนมัติเมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉินขึ้นได้ แต่ทั้งนี้ระบบไฟฟ้าที่ต้องการนำไปใช้งานก็ควรจะมีการเก็บค่าต่างๆในระบบไว้อย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน
2. หลักการในส่วนต่างๆของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการแก้ปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังในด้านอื่นๆได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ในรูปแบบการประมาณเชิงเส้นที่แสดงในบทที่ 3 ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อการปรับพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังอันได้แก่ กำลังที่ไหลในสายส่ง ระดับแรงดันที่แต่ละบัส และดัชนีวัดความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้า และการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า, พฤศจิกายน 2543
- [2] P. Kundur. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., 1994
- [3] Hadi Saadat. Power System Analysis. 2004.
- [4] พรเทพ เทียบรัตน์, วัชรินทร์ ยกย่อง, และ กุลยศ อุดมวงศ์เสรี. PQ Voltage Stability Index (PQVSI) for Voltage Stability Analysis. EE Conference 2008
- [5] วริษฐ์ อันทอง. การจัดสรรค่าบริการระบบส่งไฟฟ้าสำหรับระบบการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสมระหว่างการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางและการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [6] K. Audomvongseree and A. Yokoyama, Transmission Loss Allocation for a Multiple-Transaction Market in the Deregulated Environment. IEE Japan, Vol. PE-04, No. 114.116.118-125.127-128, page.39-44 (2004)
- [7] บัณฑิต เจริญพันธ์, แผนการปลดโหลดอย่างเหมาะสมในสภาวะผิดปกติโดยคำนึงถึงปัญหาเสถียรภาพทางแรงดัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [8] K. Audomvongseree, Transmission Reliability Assessment in the Deregulated Environment by means of Probabilistic Approaches, Doctoral dissertation in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of Engineering, the University of Tokyo, September 2004
- [9] กานต์ วงษ์ปาน. การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งสำหรับระบบการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสมระหว่างการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางและการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [10] ยุคลธร บรรเท็ง และ กุลยศ อุดมวงศ์เสรี. การแก้ปัญหาการขัดข้องในระบบส่งสำหรับการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดแบบคู่สัญญา, Transmission Congestion Management in the Bilateral Contract Market. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON 33), 2553.

- [11] Nash, S. G., Sofer, A. Linear and Nonlinear Programming. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [12] Dantzig, G. B., Orden, A., and Wolfe, P. Generalized Simplex Method for Minimizing a Linear from Under Linear Inequality Constraints. Pacific Journal Math 5 (1955): 183-195.
- [13] Chinneck, J. W. Practical Optimization: a Gentle Introduction. Canada: Carleton University, 2004.
- [14] Zhang, Y. Solving Large-Scale Linear Programs by Interior-Point Methods Under the MATLAB Environment. Technical Report TR96-01, Department of Mathematics and Statistics, University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, MD 1 (July 1995): 1-30.
- [15] V.Zamani Farahani, A. Kazaemi, and A.Biglari Majd, Congestion Management in Bilateral Based Power Market by FACTs Devices and Load Curtailments Power India Conference, 2006 IEEE.
- [16] Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman, Introduction to Operations Research. McGraw-Hill, 2001.
- [17] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load Representation for dynamic performance analysis. IEEE Transactions on Power Systems 8 (May 1993): 472-482.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ก**  
**ระบบทดสอบ IEEE RTS-79**

ในภาคผนวก ก ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของระบบทดสอบ IEEE RTS-79 โดยในระบบทดสอบนี้จะประกอบด้วยบัส 24 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 11 เครื่อง และสายส่ง 38 เส้น โดยค่าฐานของการคำนวณเป็น 100 MVA รายละเอียดของข้อมูลของบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลสายส่ง และข้อมูลการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญาได้แสดงดังตารางที่ ก.1 ก.2 ก.3 และ ก.4 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE-RTS79

บัส	ประเภท	ความต้องการกำลังไฟฟ้า		อุปกรณ์ตัวต่อแบบขนาน		แรงดันสูงสุด (p.u.)	แรงดันต่ำสุด (p.u.)
		P(MW)	Q(MVAr)	$G_s$ (Mw)	$B_s$ (MVAr)		
1	บัสควบคุมแรงดัน	108	22	0	0	1.05	0.95
2	บัสควบคุมแรงดัน	97	20	0	0	1.05	0.95
3	โหลดบัส	180	37	0	0	1.05	0.95
4	โหลดบัส	74	15	0	0	1.05	0.95
5	โหลดบัส	71	14	0	0	1.05	0.95
6	โหลดบัส	136	28	0	-100	1.05	0.95
7	บัสควบคุมแรงดัน	125	25	0	0	1.05	0.95
8	โหลดบัส	171	35	0	0	1.05	0.95
9	โหลดบัส	175	36	0	0	1.05	0.95
10	โหลดบัส	195	40	0	0	1.05	0.95
11	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95
12	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95
13	บัสอ้างอิง	265	54	0	0	1.05	0.95
14	บัสควบคุมแรงดัน	194	39	0	0	1.05	0.95
15	บัสควบคุมแรงดัน	317	64	0	0	1.05	0.95
16	บัสควบคุมแรงดัน	100	20	0	0	1.05	0.95
17	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบ (ต่อ)

บัส	ประเภท	ความต้องการกำลังไฟฟ้า		อุปกรณ์ตัวต่อแบบขนาน		แรงดันสูงสุด (p.u.)	แรงดันต่ำสุด (p.u.)
		P(MW)	Q(MVAr)	$G_s$ (Mw)	$B_s$ (MVAr)		
18	บัสควบคุมแรงดัน	333	68	0	0	1.05	0.95
19	โหลดบัส	181	37	0	0	1.05	0.95
20	โหลดบัส	128	26	0	0	1.05	0.95
21	บัสควบคุมแรงดัน	0	0	0	0	1.05	0.95
22	บัสควบคุมแรงดัน	0	0	0	0	1.05	0.95
23	บัสควบคุมแรงดัน	0	0	0	0	1.05	0.95
24	โหลดบัส	0	0	0	0	1.05	0.95

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัส	กำลังการผลิต (MW)	แรงดันที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)	พิกัดกำลังรีแอกทีฟ (MVAr)	
			สูงสุด	ต่ำสุด
1	200	1.035	80	-50
2	260	1.035	80	-50
13	400	1.020	240	0
18	400	1.050	200	-50
21	500	1.050	200	-50

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	อัตราส่วนหม้อแปลง	
		R	X	B		ขนาด	มุม
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	175	0	0
1	3	0.0546	0.2112	0.0572	175	0	0
1	5	0.0218	0.0845	0.0229	175	0	0
2	4	0.0328	0.1267	0.0343	175	0	0
2	6	0.0497	0.192	0.052	175	0	0
3	9	0.0308	0.119	0.0322	175	0	0
3	24	0.0023	0.0839	0	400	1.015	0
4	9	0.0268	0.1037	0.0281	175	0	0
5	10	0.0139	0.0605	0.0239	175	0	0
6	10	0.0139	0.0605	2.459	400	0	0
7	8	0.0159	0.0614	0.0166	175	0	0
8	9	0.0427	0.1651	0.0447	175	0	0
8	10	0.0427	0.1651	0.0447	175	0	0
9	11	0.0023	0.0839	0	400	1.03	0
9	12	0.0023	0.0839	0	400	1.03	0
10	11	0.0023	0.0839	0	400	1.015	0
10	12	0.0023	0.0839	0	400	1.015	0
11	13	0.0061	0.0476	0.0999	500	0	0
11	14	0.0054	0.0418	0.0879	500	0	0
12	13	0.0061	0.0476	0.0999	500	0	0
12	23	0.0124	0.0966	0.0203	500	0	0
13	23	0.0111	0.0865	0.1818	500	0	0
14	16	0.0050	0.0589	0.0818	500	0	0
15	16	0.0020	0.0173	0.0364	500	0	0
15	21	0.0063	0.049	0.103	500	0	0
15	21	0.0063	0.049	0.103	500	0	0
15	24	0.0067	0.0519	0.1091	500	0	0

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า (ต่อ)

บัส ต้นทาง	บัส ปลายทาง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง(p.u.)			พิกัดสายส่ง (MVA)	อัตราส่วนหม้อแปลง	
		R	X	B		ขนาด	มุม
16	17	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	0
16	19	0.0030	0.0231	0.049	500	0	0
17	18	0.0018	0.0144	0.0303	500	0	0
17	22	0.0135	0.1053	0.2212	500	0	0
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	0
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	0
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500	0	0
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500	0	0
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500	0	0
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500	0	0
21	22	0.0087	0.0678	0.1424	500	0	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### การประมาณเชิงเส้นพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้า

ในภาคผนวก ข จะแสดงการเปรียบเทียบผลของการประมาณเชิงเส้นของพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีที่นำเสนอ กับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอ เราสามารถตรวจสอบความถูกต้องจากการประมาณเชิงเส้นของฟังก์ชันต่างๆได้ด้วยการเทียบค่าระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันนั้นๆ แล้วคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีการหารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ดังหัวข้อที่ 4.3 ที่ได้อธิบายไว้แล้ว และพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาพิจารณา คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง แรงดันที่โหลด บัส กำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน โดยทำการประมาณเชิงเส้นให้ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลง และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังสมการ ข.1-ข.5

$$[\Delta S_{ij}] = [K_T \quad 0 \quad 0][X] \quad (\text{ค.1})$$

$$[\Delta V^{PQ}] = [G_T \quad G_V \quad G_a][X] \quad (\text{ค.2})$$

$$[\Delta Q_i^{PV}] = [H_T \quad H_V \quad H_a][X] \quad (\text{ค.3})$$

$$[\Delta \lambda] = [L_T \quad 0 \quad 0][X] \quad (\text{ค.4})$$

$$[X] = [\Delta T \quad \Delta V^{PV} \quad \Delta a]^T \quad (\text{ค.5})$$

โดยที่	$K_T$	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ
	$G_T, G_V, G_a$	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันที่บัสกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ
	$H_T, H_V, H_a$	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ

$L_T$	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ
$\Delta T$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา
$\Delta V^{PV}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\Delta \alpha$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลง
$\Delta S$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง
$\Delta V^{PQ}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่โหลดบัส
$\Delta Q^{PV}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\Delta \lambda$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้บัส 13 เป็นบัสอ้างอิง ซึ่งค่าที่เกี่ยวข้องกับบัสอ้างอิงจะไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากบัสอ้างอิงจะเป็นบัสที่ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา ที่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง แรงดันที่โหลดบัส กำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน ส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลง และการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเฉพาะแรงดันที่โหลดบัส และกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอ ดังนี้

#### ข.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา 5 คู่สัญญา เราจึงสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงไปของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง แรงดันที่โหลดบัส กำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และดัชนีเสถียรภาพทางแรงดัน ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาทั้ง 5 คู่สัญญา เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังนี้

##### ข.1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.1-ข.4

ตารางที่ ข.1 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.296921	0.296825	-0.000096	-0.000096	-0.1881%
2	1.128431	1.128876	0.000445	0.000445	0.0033%
3	1.067002	1.067192	0.000190	0.000190	0.0002%
4	1.143578	1.143779	0.000202	0.000202	0.0010%
5	1.332217	1.332339	0.000123	0.000123	0.0001%
6	0.335296	0.335213	-0.000083	-0.000084	-0.2529%
7	1.133039	1.133297	0.000258	0.000258	0.0043%
8	1.096287	1.096481	0.000195	0.000195	-0.0005%
9	0.996903	0.997105	0.000202	0.000202	-0.0012%
10	1.506511	1.506422	-0.000089	-0.000089	-0.0015%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.282107	0.282158	0.000051	0.000051	0.0038%
13	0.295835	0.295883	0.000049	0.000049	0.0052%
14	1.257731	1.257821	0.000090	0.000090	0.0103%
15	1.733905	1.733999	0.000095	0.000095	0.0092%
16	1.165212	1.165213	0.000001	0.000001	0.5309%
17	1.455163	1.455130	-0.000033	-0.000034	-0.0135%
18	2.522032	2.522076	0.000043	0.000043	0.0325%
19	1.653991	1.654066	0.000075	0.000075	0.0037%
20	1.627530	1.627538	0.000008	0.000008	0.1612%
21	0.556590	0.556522	-0.000068	-0.000068	0.0034%
22	0.391527	0.391587	0.000060	0.000060	0.0125%
23	2.633144	2.633051	-0.000093	-0.000093	0.0012%
24	0.718723	0.718923	0.000200	0.000200	0.0049%

ตารางที่ ข.1 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
25	2.806636	2.806678	0.000042	0.000042	0.0113%
26	2.806636	2.806678	0.000042	0.000042	0.0113%
27	1.126633	1.126916	0.000283	0.000283	0.0117%
28	3.465259	3.465237	-0.000022	-0.000022	-0.0108%
29	0.394767	0.394720	-0.000046	-0.000046	-0.0350%
30	3.310923	3.310906	-0.000016	-0.000016	-0.0172%
31	0.371558	0.371561	0.000002	0.000002	0.0316%
32	0.399217	0.399237	0.000020	0.000020	0.0041%
33	0.399217	0.399237	0.000020	0.000020	0.0041%
34	0.146194	0.146164	-0.000030	-0.000030	-0.0336%
35	0.146194	0.146164	-0.000030	-0.000030	-0.0336%
36	0.099108	0.099066	-0.000042	-0.000042	-0.0252%
37	0.099108	0.099066	-0.000042	-0.000042	-0.0252%
38	0.368609	0.368599	-0.000010	-0.000010	0.0104%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0010458 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ข.2 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าใน  
คู่สัญญาที่ 1

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951403	-0.000038	-0.000038	0.0113%
4	0.987588	0.987578	-0.000011	-0.000011	0.0133%
5	1.022219	1.022213	-0.000005	-0.000005	0.0115%
6	0.965039	0.965031	-0.000008	-0.000008	0.0113%
7	0.991748	0.991736	-0.000011	-0.000011	0.0135%
8	0.991242	0.991231	-0.000011	-0.000011	0.0135%
9	0.960242	0.960228	-0.000014	-0.000014	0.0143%
10	1.013973	1.013965	-0.000008	-0.000008	0.0120%
11	0.972669	0.972663	-0.000006	-0.000006	0.0150%
12	0.988461	0.988456	-0.000005	-0.000005	0.0152%
14	0.949203	0.949198	-0.000005	-0.000005	0.0156%
15	0.997720	0.997714	-0.000005	-0.000005	0.0128%
16	1.001970	1.001967	-0.000003	-0.000003	0.0146%
17	1.034097	1.034096	-0.000001	-0.000001	0.0150%
19	1.007722	1.007719	-0.000003	-0.000003	0.0153%
20	1.010513	1.010510	-0.000003	-0.000003	0.0157%
22	1.051527	1.051527	0.000000	0.000000	0.0153%
23	1.010632	1.010629	-0.000003	-0.000003	0.0158%
24	0.969943	0.969923	-0.000020	-0.000020	0.0118%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0001391%

ตารางที่ ข.3 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.084571	0.000136	0.000136	0.0389%
2	0.041986	0.042150	0.000164	0.000164	0.0128%
18	0.649059	0.649139	0.000081	0.000081	0.0152%
21	1.659453	1.659684	0.000231	0.000231	0.0127%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0002273%

ตารางที่ ข.4 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1

สายส่งเส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	0.013214	0.013211	-0.000003	-0.000003	-0.1115%
2	0.538988	0.539169	0.000182	0.000180	1.0567%
3	0.181694	0.181735	0.000040	0.000040	0.3701%
4	0.341125	0.341185	0.000060	0.000059	1.8828%
5	0.538036	0.538079	0.000043	0.000043	0.7985%
6	0.031920	0.031802	-0.000118	-0.000118	0.0457%
7	0.224969	0.225053	0.000084	0.000081	3.1250%
8	0.276596	0.276643	0.000047	0.000045	2.4717%
9	0.182195	0.182233	0.000038	0.000038	0.5885%
10	0.437866	0.437863	-0.000003	-0.000003	2.5836%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.168625	0.168647	0.000022	0.000021	5.6013%

ตารางที่ ข.4 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
13	0.143467	0.143491	0.000024	0.000023	4.7919%
14	0.200696	0.200727	0.000031	0.000028	7.1350%
15	0.304520	0.304552	0.000032	0.000030	6.5717%
16	0.001730	0.001725	-0.000005	-0.000005	0.3040%
17	0.064719	0.064705	-0.000014	-0.000014	-1.1276%
18	0.317759	0.317774	0.000015	0.000015	2.4544%
19	0.176367	0.176375	0.000008	0.000008	-1.0567%
20	0.214960	0.214973	0.000013	0.000013	2.8322%
21	0.140188	0.140185	-0.000003	-0.000003	-9.1182%
22	0.098580	0.098598	0.000018	0.000017	0.8640%
23	0.388709	0.388704	-0.000005	-0.000005	-4.5139%
24	0.031789	0.031800	0.000010	0.000010	-0.2873%
25	0.334421	0.334433	0.000012	0.000015	-20.8635%
26	0.334421	0.334433	0.000012	0.000015	-20.8635%
27	0.178054	0.178112	0.000058	0.000058	0.2202%
28	0.223160	0.223164	0.000004	0.000004	2.1186%
29	0.002109	0.002105	-0.000003	-0.000003	-0.2254%
30	0.114806	0.114808	0.000002	0.000002	2.3831%
31	0.117818	0.117820	0.000002	0.000002	1.9795%
32	0.019781	0.019782	0.000001	0.000001	-5.9476%
33	0.019781	0.019782	0.000001	0.000001	-5.9476%
34	0.003261	0.003256	-0.000005	-0.000005	4.6612%
35	0.003261	0.003256	-0.000005	-0.000005	4.6612%
36	0.003332	0.003329	-0.000003	-0.000004	-23.0343%

ตารางที่ ข.4 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 1 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
37	0.003332	0.003329	-0.000003	-0.000004	-23.0343%
38	0.032894	0.032894	0.000000	0.000000	7.9892%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0798287 %

### ข.1.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.5-ข.8

ตารางที่ ข.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.296921	0.297033	0.000112	0.000112	0.2178%
2	1.128431	1.128537	0.000106	0.000106	-0.0011%
3	1.067002	1.067233	0.000231	0.000231	0.0045%
4	1.143578	1.143718	0.000141	0.000141	-0.0010%
5	1.332217	1.332659	0.000442	0.000442	0.0069%
6	0.335296	0.335300	0.000003	0.000003	0.0054%
7	1.133039	1.133007	-0.000032	-0.000032	-0.0121%
8	1.096287	1.096422	0.000136	0.000136	-0.0019%
9	0.996903	0.997163	0.000260	0.000260	0.0006%
10	1.506511	1.507129	0.000618	0.000618	0.0023%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%

ตารางที่ ข.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
12	0.282107	0.282038	-0.000068	-0.000068	0.0064%
13	0.295835	0.295765	-0.000070	-0.000070	0.0074%
14	1.257731	1.257693	-0.000038	-0.000038	-0.0060%
15	1.733905	1.733859	-0.000045	-0.000045	-0.0051%
16	1.165212	1.165335	0.000123	0.000123	0.0175%
17	1.455163	1.455316	0.000153	0.000153	0.0109%
18	2.522032	2.522106	0.000074	0.000074	0.0247%
19	1.653991	1.653936	-0.000055	-0.000055	0.0078%
20	1.627530	1.627590	0.000061	0.000061	0.0315%
21	0.556590	0.556582	-0.000008	-0.000008	-0.0032%
22	0.391527	0.391526	-0.000001	-0.000001	-0.9509%
23	2.633144	2.633183	0.000039	0.000039	0.0061%
24	0.718723	0.718675	-0.000048	-0.000048	0.0011%
25	2.806636	2.806639	0.000003	0.000003	0.0489%
26	2.806636	2.806639	0.000003	0.000003	0.0489%
27	1.126633	1.126595	-0.000038	-0.000038	-0.0104%
28	3.465259	3.465278	0.000018	0.000018	0.0069%
29	0.394767	0.394754	-0.000012	-0.000012	0.0300%
30	3.310923	3.310942	0.000019	0.000019	0.0083%
31	0.371558	0.371562	0.000004	0.000004	0.0111%
32	0.399217	0.399214	-0.000003	-0.000003	-0.0087%
33	0.399217	0.399214	-0.000003	-0.000003	-0.0087%
34	0.146194	0.146189	-0.000005	-0.000005	0.0372%
35	0.146194	0.146189	-0.000005	-0.000005	0.0372%

ตารางที่ ข.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
36	0.099108	0.099105	-0.000003	-0.000003	0.0672%
37	0.099108	0.099105	-0.000003	-0.000003	0.0672%
38	0.368609	0.368606	-0.000003	-0.000003	0.0189%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0015998 %

ตารางที่ ข.6 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951435	-0.000006	-0.000006	0.0109%
4	0.987588	0.987581	-0.000008	-0.000008	0.0107%
5	1.022219	1.022206	-0.000013	-0.000013	0.0142%
6	0.965039	0.964988	-0.000050	-0.000050	0.0126%
7	0.991748	0.991732	-0.000016	-0.000016	0.0141%
8	0.991242	0.991226	-0.000016	-0.000016	0.0141%
9	0.960242	0.960232	-0.000010	-0.000010	0.0126%
10	1.013973	1.013949	-0.000023	-0.000023	0.0142%
11	0.972669	0.972661	-0.000008	-0.000008	0.0145%
12	0.988461	0.988453	-0.000008	-0.000008	0.0144%
14	0.949203	0.949197	-0.000006	-0.000006	0.0144%
15	0.997720	0.997718	-0.000002	-0.000002	0.0147%
16	1.001970	1.001968	-0.000002	-0.000002	0.0142%



ตารางที่ ข.6 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าใน  
คู่สัญญาที่ 2 (ต่อ)

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
17	1.034097	1.034097	-0.000001	-0.000001	0.0140%
19	1.007722	1.007720	-0.000003	-0.000003	0.0143%
20	1.010513	1.010510	-0.000003	-0.000003	0.0143%
22	1.051527	1.051527	0.000000	0.000000	0.0138%
23	1.010632	1.010629	-0.000003	-0.000003	0.0144%
24	0.969943	0.969940	-0.000003	-0.000003	0.0144%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0001377 %

ตารางที่ ข.7 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ  
การซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.084495	0.000212	0.000212	0.0146%
2	0.041986	0.042216	0.000230	0.000230	0.0274%
18	0.649059	0.649112	0.000053	0.000053	0.0139%
21	1.659453	1.659521	0.000068	0.000068	0.0150%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0001859 %

ตารางที่ ข.8 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.013214	0.013218	0.000004	0.000004	0.1895%
2	0.538988	0.539027	0.000039	0.000038	1.1761%
3	0.181694	0.181758	0.000064	0.000063	1.0301%
4	0.341125	0.341167	0.000042	0.000041	0.9778%
5	0.538036	0.538226	0.000191	0.000189	0.5679%
6	0.031920	0.031936	0.000016	0.000016	1.1030%
7	0.224969	0.224970	0.000001	0.000001	-1.4468%
8	0.276596	0.276629	0.000033	0.000032	1.4899%
9	0.182195	0.182258	0.000063	0.000062	1.2297%
10	0.437866	0.437962	0.000097	0.000097	-0.1495%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.168625	0.168595	-0.000030	-0.000029	1.1665%
13	0.143467	0.143437	-0.000030	-0.000029	1.1267%
14	0.200696	0.200694	-0.000002	-0.000002	6.0329%
15	0.304520	0.304519	-0.000001	-0.000001	5.2878%
16	0.001730	0.001735	0.000006	0.000006	1.4681%
17	0.064719	0.064759	0.000040	0.000039	2.4187%
18	0.317759	0.317781	0.000022	0.000022	0.8681%
19	0.176367	0.176362	-0.000005	-0.000005	0.2459%
20	0.214960	0.214983	0.000023	0.000023	0.7958%
21	0.140188	0.140205	0.000017	0.000016	0.6200%
22	0.098580	0.098590	0.000009	0.000009	1.1498%
23	0.388709	0.388721	0.000012	0.000012	0.6368%
24	0.031789	0.031787	-0.000003	-0.000003	-0.6208%

ตารางที่ ข.8 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 2 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
25	0.334421	0.334424	0.000003	0.000003	2.6520%
26	0.334421	0.334424	0.000003	0.000003	2.6520%
27	0.178054	0.178054	0.000000	0.000000	3.7620%
28	0.223160	0.223164	0.000004	0.000004	1.2201%
29	0.002109	0.002109	0.000000	0.000000	-1.4590%
30	0.114806	0.114808	0.000002	0.000002	1.1842%
31	0.117818	0.117819	0.000002	0.000001	1.2426%
32	0.019781	0.019781	0.000000	0.000000	-6.6207%
33	0.019781	0.019781	0.000000	0.000000	-6.6207%
34	0.003261	0.003262	0.000001	0.000001	1.3874%
35	0.003261	0.003262	0.000001	0.000001	1.3874%
36	0.003332	0.003332	0.000001	0.000001	6.3686%
37	0.003332	0.003332	0.000001	0.000001	6.3686%
38	0.032894	0.032895	0.000001	0.000001	0.9880%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0280110 %

### ข.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3 เท่ากับ 0.001 p.u.

การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.9-ข.12

ตารางที่ ข.9 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.296921	0.296909	-0.000012	-0.000012	-0.0206%
2	1.128431	1.128445	0.000014	0.000014	0.0093%
3	1.067002	1.066933	-0.000068	-0.000068	0.0038%
4	1.143578	1.143644	0.000066	0.000066	0.0069%
5	1.332217	1.332178	-0.000038	-0.000038	0.0014%
6	0.335296	0.335299	0.000003	0.000003	0.9598%
7	1.133039	1.133155	0.000116	0.000116	0.0019%
8	1.096287	1.096358	0.000071	0.000071	0.0038%
9	0.996903	0.996842	-0.000061	-0.000061	0.0015%
10	1.506511	1.506520	0.000010	0.000010	0.0011%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.282107	0.282191	0.000085	0.000085	0.0011%
13	0.295835	0.295917	0.000083	0.000083	0.0019%
14	1.257731	1.258050	0.000319	0.000319	0.0028%
15	1.733905	1.734239	0.000335	0.000335	0.0011%
16	1.165212	1.165172	-0.000040	-0.000040	0.0002%
17	1.455163	1.455154	-0.000009	-0.000009	-0.0167%
18	2.522032	2.522470	0.000437	0.000437	0.0007%
19	1.653991	1.653957	-0.000034	-0.000034	0.0047%
20	1.627530	1.627939	0.000410	0.000410	0.0013%
21	0.556590	0.556606	0.000016	0.000016	0.0114%
22	0.391527	0.391685	0.000158	0.000158	0.0060%
23	2.633144	2.633157	0.000013	0.000013	0.0099%
24	0.718723	0.718793	0.000070	0.000070	0.0052%

ตารางที่ ข.9 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
25	2.806636	2.806658	0.000022	0.000022	0.0070%
26	2.806636	2.806658	0.000022	0.000022	0.0070%
27	1.126633	1.126763	0.000130	0.000130	0.0030%
28	3.465259	3.465252	-0.000007	-0.000007	-0.0236%
29	0.394767	0.394696	-0.000071	-0.000071	-0.0157%
30	3.310923	3.310919	-0.000003	-0.000003	-0.0583%
31	0.371558	0.371561	0.000003	0.000003	0.0156%
32	0.399217	0.399228	0.000011	0.000011	0.0024%
33	0.399217	0.399228	0.000011	0.000011	0.0024%
34	0.146194	0.146153	-0.000042	-0.000042	-0.0161%
35	0.146194	0.146153	-0.000042	-0.000042	-0.0161%
36	0.099108	0.099057	-0.000052	-0.000052	-0.0116%
37	0.099108	0.099057	-0.000052	-0.000052	-0.0116%
38	0.368609	0.368602	-0.000007	-0.000007	0.0074%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0015625 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.10 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าใน  
คู่สัญญาที่ 3

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951432	-0.000010	-0.000010	0.0093%
4	0.987588	0.987576	-0.000012	-0.000012	0.0078%
5	1.022219	1.022216	-0.000003	-0.000003	0.0127%
6	0.965039	0.965033	-0.000005	-0.000005	0.0121%
7	0.991748	0.991733	-0.000014	-0.000014	0.0092%
8	0.991242	0.991228	-0.000014	-0.000014	0.0092%
9	0.960242	0.960221	-0.000020	-0.000020	0.0080%
10	1.013973	1.013965	-0.000007	-0.000007	0.0112%
11	0.972669	0.972659	-0.000009	-0.000009	0.0094%
12	0.988461	0.988452	-0.000009	-0.000009	0.0093%
14	0.949203	0.949196	-0.000007	-0.000007	0.0095%
15	0.997720	0.997717	-0.000003	-0.000003	0.0093%
16	1.001970	1.001968	-0.000003	-0.000003	0.0097%
17	1.034097	1.034096	-0.000001	-0.000001	0.0099%
19	1.007722	1.007719	-0.000003	-0.000003	0.0102%
20	1.010513	1.010510	-0.000004	-0.000004	0.0103%
22	1.051527	1.051527	0.000000	0.000000	0.0101%
23	1.010632	1.010628	-0.000004	-0.000004	0.0103%
24	0.969943	0.969936	-0.000006	-0.000006	0.0088%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000988 %



ตารางที่ ข.11 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.084622	0.000085	0.000085	0.0109%
2	0.041986	0.042111	0.000125	0.000125	0.0092%
18	0.649059	0.649125	0.000067	0.000067	0.0100%
21	1.659453	1.659570	0.000117	0.000117	0.0091%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000983 %

ตารางที่ ข.12 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3

สายส่งเส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	0.013214	0.013214	0.000000	0.000000	1.6513%
2	0.538988	0.539008	0.000020	0.000020	1.1707%
3	0.181694	0.181691	-0.000003	-0.000003	0.3604%
4	0.341125	0.341162	0.000037	0.000036	3.9409%
5	0.538036	0.538035	-0.000001	-0.000001	-0.4382%
6	0.031920	0.031964	0.000044	0.000043	2.5519%
7	0.224969	0.224998	0.000029	0.000027	5.7369%
8	0.276596	0.276630	0.000033	0.000032	4.3268%
9	0.182195	0.182193	-0.000001	-0.000001	-3.9812%
10	0.437866	0.437864	-0.000001	-0.000001	3.8226%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.168625	0.168664	0.000040	0.000038	4.5491%

ตารางที่ ข.12 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
13	0.143467	0.143509	0.000042	0.000040	4.1020%
14	0.200696	0.200782	0.000086	0.000082	4.2767%
15	0.304520	0.304603	0.000083	0.000079	4.2528%
16	0.001730	0.001732	0.000003	0.000003	4.3237%
17	0.064719	0.064733	0.000013	0.000012	5.4627%
18	0.317759	0.317811	0.000052	0.000051	0.3648%
19	0.176367	0.176364	-0.000003	-0.000003	-1.8613%
20	0.214960	0.215013	0.000053	0.000053	0.2596%
21	0.140188	0.140210	0.000022	0.000022	-0.0558%
22	0.098580	0.098615	0.000034	0.000034	0.5042%
23	0.388709	0.388719	0.000010	0.000010	-0.0878%
24	0.031789	0.031792	0.000002	0.000002	3.9008%
25	0.334421	0.334427	0.000006	0.000006	-4.5336%
26	0.334421	0.334427	0.000006	0.000006	-4.5336%
27	0.178054	0.178074	0.000020	0.000020	2.8863%
28	0.223160	0.223164	0.000003	0.000003	1.4413%
29	0.002109	0.002105	-0.000003	-0.000003	0.9631%
30	0.114806	0.114808	0.000002	0.000002	1.4339%
31	0.117818	0.117819	0.000002	0.000001	1.4452%
32	0.019781	0.019781	0.000001	0.000001	-4.0120%
33	0.019781	0.019781	0.000001	0.000001	-4.0120%
34	0.003261	0.003257	-0.000004	-0.000004	0.0604%
35	0.003261	0.003257	-0.000004	-0.000004	0.0604%
36	0.003332	0.003330	-0.000002	-0.000002	3.4289%

ตารางที่ ข.12 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 3 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
37	0.003332	0.003330	-0.000002	-0.000002	3.4289%
38	0.032894	0.032895	0.000000	0.000000	1.3570%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0309618 %

#### ข.1.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.13-ข.16

ตารางที่ ข.13 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.296921	0.296915	-0.000005	-0.000005	-0.0092%
2	1.128431	1.128394	-0.000037	-0.000037	0.0002%
3	1.067002	1.067008	0.000006	0.000006	-0.0080%
4	1.143578	1.143581	0.000003	0.000003	0.0052%
5	1.332217	1.332228	0.000011	0.000011	0.0021%
6	0.335296	0.335328	0.000031	0.000031	0.0183%
7	1.133039	1.133129	0.000090	0.000090	0.0020%
8	1.096287	1.096292	0.000005	0.000005	0.0062%
9	0.996903	0.996916	0.000012	0.000012	-0.0004%
10	1.506511	1.506493	-0.000017	-0.000017	0.0046%

ตารางที่ ข.13 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.282107	0.282102	-0.000004	-0.000004	-0.0029%
13	0.295835	0.295831	-0.000004	-0.000004	-0.0032%
14	1.257731	1.257633	-0.000098	-0.000098	0.0031%
15	1.733905	1.733928	0.000024	0.000024	0.0062%
16	1.165212	1.165145	-0.000067	-0.000067	0.0054%
17	1.455163	1.455184	0.000020	0.000020	0.0045%
18	2.522032	2.522225	0.000192	0.000192	0.0056%
19	1.653991	1.654412	0.000421	0.000421	0.0038%
20	1.627530	1.627511	-0.000019	-0.000019	-0.0220%
21	0.556590	0.556669	0.000079	0.000079	0.0017%
22	0.391527	0.391407	-0.000120	-0.000120	0.0003%
23	2.633144	2.633789	0.000644	0.000644	-0.0009%
24	0.718723	0.718387	-0.000336	-0.000336	0.0015%
25	2.806636	2.806857	0.000221	0.000221	0.0009%
26	2.806636	2.806857	0.000221	0.000221	0.0009%
27	1.126633	1.126738	0.000105	0.000105	0.0010%
28	3.465259	3.465794	0.000535	0.000535	0.0000%
29	0.394767	0.394900	0.000134	0.000134	0.0236%
30	3.310923	3.311479	0.000556	0.000556	0.0006%
31	0.371558	0.371578	0.000020	0.000020	0.0067%
32	0.399217	0.399446	0.000229	0.000229	0.0005%
33	0.399217	0.399446	0.000229	0.000229	0.0005%
34	0.146194	0.146271	0.000077	0.000077	0.0220%

ตารางที่ ข.13 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
35	0.146194	0.146271	0.000077	0.000077	0.0220%
36	0.099108	0.099199	0.000091	0.000090	0.0141%
37	0.099108	0.099199	0.000091	0.000090	0.0141%
38	0.368609	0.368600	-0.000009	-0.000009	0.0116%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000937 %

ตารางที่ ข.14 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951437	-0.000004	-0.000004	0.0125%
4	0.987588	0.987585	-0.000003	-0.000003	0.0093%
5	1.022219	1.022216	-0.000003	-0.000003	0.0083%
6	0.965039	0.965034	-0.000005	-0.000005	0.0086%
7	0.991748	0.991742	-0.000006	-0.000006	0.0092%
8	0.991242	0.991236	-0.000006	-0.000006	0.0092%
9	0.960242	0.960235	-0.000006	-0.000006	0.0094%
10	1.013973	1.013967	-0.000006	-0.000006	0.0087%
11	0.972669	0.972659	-0.000010	-0.000010	0.0089%
12	0.988461	0.988457	-0.000004	-0.000004	0.0094%
14	0.949203	0.949182	-0.000021	-0.000021	0.0080%
15	0.997720	0.997714	-0.000006	-0.000006	0.0093%
16	1.001970	1.001962	-0.000008	-0.000008	0.0096%

ตารางที่ ข.14 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าใน  
คู่สัญญาที่ 4 (ต่อ)

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
17	1.034097	1.034094	-0.000003	-0.000003	0.0095%
19	1.007722	1.007715	-0.000007	-0.000007	0.0101%
20	1.010513	1.010508	-0.000006	-0.000006	0.0104%
22	1.051527	1.051526	-0.000001	-0.000001	0.0094%
23	1.010632	1.010627	-0.000005	-0.000005	0.0105%
24	0.969943	0.969937	-0.000006	-0.000006	0.0095%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000951%

ตารางที่ ข.15 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ  
การซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.084658	0.000049	0.000049	0.0113%
2	0.041986	0.042041	0.000055	0.000055	0.0086%
18	0.649059	0.649204	0.000146	0.000146	0.0180%
21	1.659453	1.659775	0.000322	0.000322	0.0088%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0001229 %



ตารางที่ ข.16 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.013214	0.013214	0.000000	0.000000	-0.7778%
2	0.538988	0.538985	-0.000003	-0.000003	-3.5720%
3	0.181694	0.181702	0.000007	0.000007	0.6901%
4	0.341125	0.341132	0.000007	0.000007	1.8880%
5	0.538036	0.538046	0.000010	0.000010	0.8727%
6	0.031920	0.031941	0.000021	0.000021	-0.1467%
7	0.224969	0.224984	0.000015	0.000015	2.8728%
8	0.276596	0.276604	0.000007	0.000007	2.1926%
9	0.182195	0.182203	0.000008	0.000008	0.7858%
10	0.437866	0.437864	-0.000001	-0.000001	1.1315%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.168625	0.168625	0.000001	0.000001	8.7303%
13	0.143467	0.143467	0.000000	0.000000	5.9518%
14	0.200696	0.200677	-0.000019	-0.000020	-1.8982%
15	0.304520	0.304530	0.000010	0.000010	4.2329%
16	0.001730	0.001727	-0.000003	-0.000003	0.7805%
17	0.064719	0.064729	0.000009	0.000009	1.9245%
18	0.317759	0.317794	0.000035	0.000035	-0.3541%
19	0.176367	0.176425	0.000057	0.000057	-0.0043%
20	0.214960	0.214967	0.000007	0.000008	-2.5374%
21	0.140188	0.140199	0.000011	0.000011	-1.0289%
22	0.098580	0.098579	-0.000002	-0.000002	5.1266%
23	0.388709	0.388800	0.000091	0.000091	-0.0555%
24	0.031789	0.031773	-0.000016	-0.000016	0.0570%

ตารางที่ ข.16 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 4 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
25	0.334421	0.334448	0.000027	0.000027	0.9547%
26	0.334421	0.334448	0.000027	0.000027	0.9547%
27	0.178054	0.178066	0.000012	0.000012	-0.9688%
28	0.223160	0.223195	0.000034	0.000034	-0.0756%
29	0.002109	0.002113	0.000005	0.000005	0.0238%
30	0.114806	0.114827	0.000020	0.000020	-0.0587%
31	0.117818	0.117825	0.000008	0.000008	-0.1449%
32	0.019781	0.019792	0.000011	0.000011	-5.6908%
33	0.019781	0.019792	0.000011	0.000011	-5.6908%
34	0.003261	0.003266	0.000005	0.000006	-6.9958%
35	0.003261	0.003266	0.000005	0.000006	-6.9958%
36	0.003332	0.003334	0.000002	0.000002	5.3454%
37	0.003332	0.003334	0.000002	0.000002	5.3454%
38	0.032894	0.032898	0.000004	0.000004	-0.0745%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0335266 %

### ข.1.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5 เท่ากับ 0.001 p.u.

การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.17-ข.20

ตารางที่ ข.17 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	0.296921	0.296922	0.000001	0.000001	0.0045%
2	1.128431	1.128438	0.000007	0.000007	0.0047%
3	1.067002	1.066996	-0.000006	-0.000006	0.0028%
4	1.143578	1.143576	-0.000001	-0.000001	0.0013%
5	1.332217	1.332214	-0.000003	-0.000003	0.0026%
6	0.335296	0.335297	0.000001	0.000001	0.0606%
7	1.133039	1.133011	-0.000028	-0.000028	0.0021%
8	1.096287	1.096286	-0.000001	-0.000001	-0.0009%
9	0.996903	0.996898	-0.000005	-0.000005	0.0025%
10	1.506511	1.506510	0.000000	0.000000	-0.0005%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.282107	0.282108	0.000002	0.000002	0.0027%
13	0.295835	0.295837	0.000002	0.000002	0.0026%
14	1.257731	1.257735	0.000004	0.000004	0.0017%
15	1.733905	1.733913	0.000008	0.000008	0.0031%
16	1.165212	1.165203	-0.000009	-0.000009	0.0028%
17	1.455163	1.455161	-0.000002	-0.000002	0.0012%
18	2.522032	2.522050	0.000018	0.000018	0.0069%
19	1.653991	1.654011	0.000020	0.000020	0.0062%
20	1.627530	1.627543	0.000013	0.000013	0.0072%
21	0.556590	0.556596	0.000006	0.000006	-0.0010%
22	0.391527	0.391524	-0.000003	-0.000003	-0.0509%
23	2.633144	2.633133	-0.000012	-0.000012	0.0070%
24	0.718723	0.719008	0.000284	0.000284	0.0011%

ตารางที่ ข.17 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
25	2.806636	2.806989	0.000352	0.000352	-0.0002%
26	2.806636	2.806989	0.000352	0.000352	-0.0002%
27	1.126633	1.126605	-0.000028	-0.000028	0.0017%
28	3.465259	3.465521	0.000262	0.000262	-0.0001%
29	0.394767	0.394799	0.000032	0.000032	0.0021%
30	3.310923	3.311166	0.000244	0.000244	0.0003%
31	0.371558	0.371582	0.000024	0.000024	0.0049%
32	0.399217	0.399101	-0.000116	-0.000116	-0.0001%
33	0.399217	0.399101	-0.000116	-0.000116	-0.0001%
34	0.146194	0.146210	0.000016	0.000016	0.0031%
35	0.146194	0.146210	0.000016	0.000016	0.0031%
36	0.099108	0.099121	0.000013	0.000013	0.0073%
37	0.099108	0.099121	0.000013	0.000013	0.0073%
38	0.368609	0.368624	0.000015	0.000015	0.0081%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0001336 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.18 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าใน  
คู่สัญญาที่ 5

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951438	-0.000003	-0.000003	0.0026%
4	0.987588	0.987587	-0.000001	-0.000001	0.0028%
5	1.022219	1.022218	0.000000	0.000000	0.0030%
6	0.965039	0.965038	-0.000001	-0.000001	0.0030%
7	0.991748	0.991746	-0.000001	-0.000001	0.0029%
8	0.991242	0.991241	-0.000001	-0.000001	0.0029%
9	0.960242	0.960240	-0.000002	-0.000002	0.0028%
10	1.013973	1.013972	-0.000001	-0.000001	0.0029%
11	0.972669	0.972667	-0.000002	-0.000002	0.0029%
12	0.988461	0.988460	-0.000001	-0.000001	0.0029%
14	0.949203	0.949200	-0.000003	-0.000003	0.0028%
15	0.997720	0.997713	-0.000007	-0.000007	0.0025%
16	1.001970	1.001966	-0.000004	-0.000004	0.0027%
17	1.034097	1.034096	-0.000002	-0.000002	0.0030%
19	1.007722	1.007719	-0.000003	-0.000003	0.0027%
20	1.010513	1.010510	-0.000003	-0.000003	0.0027%
22	1.051527	1.051526	-0.000001	-0.000001	0.0034%
23	1.010632	1.010629	-0.000002	-0.000002	0.0028%
24	0.969943	0.969937	-0.000005	-0.000005	0.0025%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000285 %

ตารางที่ ข.19 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.084685	0.000023	0.000023	0.0028%
2	0.041986	0.041997	0.000011	0.000011	0.0029%
18	0.649059	0.649195	0.000136	0.000136	0.0033%
21	1.659453	1.659711	0.000259	0.000259	0.0055%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000376 %

ตารางที่ ข.20 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5

สายส่งเส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	0.013214	0.013214	0.000000	0.000000	-1.1035%
2	0.538988	0.538995	0.000007	0.000007	0.6931%
3	0.181694	0.181694	0.000000	0.000000	1.1682%
4	0.341125	0.341126	0.000001	0.000001	4.8793%
5	0.538036	0.538036	0.000001	0.000001	3.0502%
6	0.031920	0.031914	-0.000006	-0.000006	-1.2084%
7	0.224969	0.224963	-0.000006	-0.000006	-2.2953%
8	0.276596	0.276598	0.000002	0.000002	4.5759%
9	0.182195	0.182195	0.000000	0.000000	4.2167%
10	0.437866	0.437865	0.000000	0.000000	1.7607%
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000%
12	0.168625	0.168626	0.000002	0.000001	5.8089%



ตารางที่ ข.20 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
13	0.143467	0.143468	0.000001	0.000001	5.3383%
14	0.200696	0.200698	0.000002	0.000002	9.6561%
15	0.304520	0.304523	0.000003	0.000003	5.7684%
16	0.001730	0.001730	0.000000	0.000000	3.8886%
17	0.064719	0.064720	0.000001	0.000001	5.1077%
18	0.317759	0.317764	0.000004	0.000005	-0.5689%
19	0.176367	0.176372	0.000004	0.000004	0.0975%
20	0.214960	0.214964	0.000004	0.000004	-0.6009%
21	0.140188	0.140185	-0.000003	-0.000003	0.5388%
22	0.098580	0.098587	0.000007	0.000007	-0.1422%
23	0.388709	0.388708	-0.000001	-0.000001	1.3673%
24	0.031789	0.031804	0.000015	0.000015	-0.0245%
25	0.334421	0.334460	0.000039	0.000041	-5.8361%
26	0.334421	0.334460	0.000039	0.000041	-5.8361%
27	0.178054	0.178050	-0.000004	-0.000004	1.7957%
28	0.223160	0.223178	0.000017	0.000017	-0.0767%
29	0.002109	0.002108	0.000000	0.000000	0.6377%
30	0.114806	0.114816	0.000009	0.000009	-0.0690%
31	0.117818	0.117825	0.000007	0.000007	-0.0791%
32	0.019781	0.019776	-0.000005	-0.000006	-5.6755%
33	0.019781	0.019776	-0.000005	-0.000006	-5.6755%
34	0.003261	0.003260	-0.000001	-0.000001	-4.0431%
35	0.003261	0.003260	-0.000001	-0.000001	-4.0431%
36	0.003332	0.003330	-0.000001	-0.000001	-0.0593%

ตารางที่ ข.20 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพทางแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในคู่สัญญาที่ 5 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
37	0.003332	0.003330	-0.000001	-0.000001	-0.0593%
38	0.032894	0.032900	0.000006	0.000006	-0.0456%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0357791 %



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแท่งหม้อแปลง

ในระบบทดสอบ IEEE RTS-79 มีหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ 5 ตัว เราจึงสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงไปของแรงดันที่โหลดบัส และกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าแท่งหม้อแปลงทั้ง 5 ตัว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังนี้

### ข.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าแท่งหม้อแปลงตัวที่ 1 (บัส 3 ไปยัง บัส 24)

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแท่งหม้อแปลงตัวที่ 1 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.21 และ ข.22

ตารางที่ ข.21 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท่งหม้อแปลงตัวที่ 1

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951779	0.000338	0.000338	-0.1337%
4	0.987588	0.987641	0.000053	0.000053	-0.1395%
5	1.022219	1.022231	0.000012	0.000012	-0.1503%
6	0.965039	0.965059	0.000021	0.000021	-0.1543%
7	0.991748	0.991808	0.000060	0.000060	-0.1444%
8	0.991242	0.991302	0.000060	0.000060	-0.1444%
9	0.960242	0.960336	0.000095	0.000095	-0.1403%
10	1.013973	1.013997	0.000024	0.000024	-0.1582%
11	0.972669	0.972688	0.000020	0.000020	-0.1957%
12	0.988461	0.988485	0.000024	0.000024	-0.1694%
14	0.949203	0.949202	-0.000001	-0.000001	2.4143%
15	0.997720	0.997661	-0.000059	-0.000059	-0.0159%
16	1.001970	1.001940	-0.000030	-0.000030	0.0029%
17	1.034097	1.034087	-0.000010	-0.000010	0.0030%
19	1.007722	1.007702	-0.000021	-0.000021	0.0251%
20	1.010513	1.010501	-0.000012	-0.000012	0.0712%

ตารางที่ ข.21 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 1(ต่อ)

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
22	1.051527	1.051523	-0.000004	-0.000004	0.0030%
23	1.010632	1.010624	-0.000008	-0.000008	0.1367%
24	0.969943	0.969679	-0.000264	-0.000264	-0.0223%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0056621%

ตารางที่ ข.22 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 1

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.086432	-0.001725	-0.001727	-0.1374%
2	0.041986	0.041446	-0.000540	-0.000541	-0.1396%
18	0.649059	0.649801	0.000742	0.000742	0.0030%
21	1.659453	1.662000	0.002548	0.002548	-0.0155%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0009825 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงตัวที่ 2 (บัส 9 ไปยัง บัส 11)

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแท็บหม้อแปลงตัวที่ 2 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.23 และ ข.24

ตารางที่ ข.23 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงตัวที่ 2

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951560	0.000119	0.000119	-0.1602%
4	0.987588	0.987735	0.000147	0.000147	-0.1540%
5	1.022219	1.022215	-0.000003	-0.000003	0.8778%
6	0.965039	0.965033	-0.000006	-0.000006	0.8870%
7	0.991748	0.991880	0.000132	0.000132	-0.1820%
8	0.991242	0.991374	0.000132	0.000132	-0.1820%
9	0.960242	0.960512	0.000271	0.000271	-0.1532%
10	1.013973	1.013965	-0.000007	-0.000007	0.8861%
11	0.972669	0.972524	-0.000145	-0.000145	-0.0208%
12	0.988461	0.988517	0.000056	0.000056	-0.1926%
14	0.949203	0.949109	-0.000094	-0.000094	-0.0123%
15	0.997720	0.997722	0.000002	0.000002	-0.9548%
16	1.001970	1.001959	-0.000011	-0.000011	0.1317%
17	1.034097	1.034094	-0.000004	-0.000004	0.1315%
19	1.007722	1.007720	-0.000002	-0.000002	1.0042%
20	1.010513	1.010518	0.000005	0.000005	-0.5913%
22	1.051527	1.051526	-0.000001	-0.000001	0.1314%
23	1.010632	1.010641	0.000009	0.000009	-0.3740%
24	0.969943	0.969989	0.000047	0.000047	-0.1868%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0051380 %

ตารางที่ ข.24 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 2

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.085240	-0.000533	-0.000534	-0.2404%
2	0.041986	0.040849	-0.001137	-0.001139	-0.1823%
18	0.649059	0.649325	0.000266	0.000266	0.1314%
21	1.659453	1.659380	-0.000072	-0.000073	-1.3214%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0068088 %

### ข.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3 (บัส 9 ไปยัง บัส 12)

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.25 และ ข.26

ตารางที่ ข.25 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951560	0.000118	0.000118	-0.1615%
4	0.987588	0.987730	0.000142	0.000142	-0.1580%
5	1.022219	1.022214	-0.000005	-0.000005	0.6161%
6	0.965039	0.965030	-0.000008	-0.000008	0.6113%
7	0.991748	0.991874	0.000126	0.000126	-0.1883%
8	0.991242	0.991368	0.000126	0.000126	-0.1883%
9	0.960242	0.960504	0.000262	0.000262	-0.1568%
10	1.013973	1.013962	-0.000010	-0.000010	0.5975%
11	0.972669	0.972722	0.000053	0.000053	-0.2012%
12	0.988461	0.988312	-0.000149	-0.000149	-0.0241%



ตารางที่ ข.25 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3 (ต่อ)

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
14	0.949203	0.949237	0.000035	0.000035	-0.2220%
15	0.997720	0.997730	0.000011	0.000011	-0.2583%
16	1.001970	1.001975	0.000004	0.000004	-0.5565%
17	1.034097	1.034099	0.000002	0.000002	-0.5489%
19	1.007722	1.007709	-0.000013	-0.000013	0.1187%
20	1.010513	1.010485	-0.000028	-0.000028	0.0254%
22	1.051527	1.051528	0.000001	0.000001	-0.5457%
23	1.010632	1.010596	-0.000036	-0.000036	0.0071%
24	0.969943	0.969994	0.000051	0.000051	-0.1774%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0035311 %

ตารางที่ ข.26 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 3

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.085221	-0.000514	-0.000515	-0.2472%
2	0.041986	0.040903	-0.001084	-0.001086	-0.1887%
18	0.649059	0.648947	-0.000111	-0.000112	-0.5460%
21	1.659453	1.658992	-0.000461	-0.000462	-0.2661%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0034117 %

### ข.2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงตัวที่ 4 (บัส 10 ไปยัง บัส 11)

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแท็บหม้อแปลงตัวที่ 4 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.27 และ ข.28

ตารางที่ ข.27 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงตัวที่ 4

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951437	-0.000005	-0.000005	0.7267%
4	0.987588	0.987588	-0.000001	-0.000001	-0.0581%
5	1.022219	1.022378	0.000159	0.000160	-0.1400%
6	0.965039	0.965312	0.000274	0.000274	-0.1429%
7	0.991748	0.991914	0.000166	0.000166	-0.1628%
8	0.991242	0.991408	0.000166	0.000166	-0.1628%
9	0.960242	0.960242	0.000000	0.000000	0.0701%
10	1.013973	1.014302	0.000329	0.000330	-0.1401%
11	0.972669	0.972519	-0.000149	-0.000149	-0.0157%
12	0.988461	0.988533	0.000072	0.000072	-0.1693%
14	0.949203	0.949103	-0.000100	-0.000100	-0.0105%
15	0.997720	0.997710	-0.000010	-0.000010	0.0672%
16	1.001970	1.001953	-0.000018	-0.000018	0.0407%
17	1.034097	1.034091	-0.000006	-0.000006	0.0402%
19	1.007722	1.007717	-0.000006	-0.000006	0.3331%
20	1.010513	1.010518	0.000005	0.000005	-0.6359%
22	1.051527	1.051525	-0.000002	-0.000002	0.0399%
23	1.010632	1.010642	0.000010	0.000010	-0.3397%
24	0.969943	0.969935	-0.000007	-0.000007	0.2462%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0026938 %

ตารางที่ ข.28 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงตัวที่ 4

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.086591	-0.001884	-0.001887	-0.1502%
2	0.041986	0.040542	-0.001444	-0.001447	-0.1659%
18	0.649059	0.649496	0.000437	0.000437	0.0399%
21	1.659453	1.659918	0.000465	0.000465	0.0660%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0011837 %

### ข.2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงตัวที่ 5 (บัส 10 ไปยัง บัส 12)

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแท็บหม้อแปลงตัวที่ 5 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.29 และ ข.30

ตารางที่ ข.29 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหนดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงตัวที่ 5

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951441	-0.000001	-0.000001	-0.0219%
4	0.987588	0.987587	-0.000001	-0.000001	-0.1009%
5	1.022219	1.022374	0.000155	0.000155	-0.1429%
6	0.965039	0.965305	0.000266	0.000267	-0.1457%
7	0.991748	0.991909	0.000161	0.000162	-0.1662%
8	0.991242	0.991404	0.000161	0.000162	-0.1662%
9	0.960242	0.960241	-0.000001	-0.000001	0.5437%
10	1.013973	1.014293	0.000321	0.000321	-0.1428%
11	0.972669	0.972738	0.000070	0.000070	-0.1747%
12	0.988461	0.988309	-0.000152	-0.000152	-0.0181%

ตารางที่ ข.29 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 5 (ต่อ)

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
14	0.949203	0.949245	0.000043	0.000043	-0.1946%
15	0.997720	0.997720	0.000000	0.000000	0.0015%
16	1.001970	1.001970	0.000000	0.000000	0.0671%
17	1.034097	1.034097	0.000000	0.000000	0.1028%
19	1.007722	1.007705	-0.000017	-0.000017	0.0682%
20	1.010513	1.010482	-0.000031	-0.000031	0.0166%
22	1.051527	1.051527	0.000000	0.000000	0.1942%
23	1.010632	1.010593	-0.000039	-0.000039	0.0044%
24	0.969943	0.969943	0.000000	0.000000	0.0676%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0017083 %

ตารางที่ ข.30 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแท็ปหม้อแปลงตัวที่ 5

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.086563	-0.001855	-0.001858	-0.1522%
2	0.041986	0.040585	-0.001401	-0.001404	-0.1694%
18	0.649059	0.649060	0.000001	0.000001	0.1186%
21	1.659453	1.659452	0.000000	0.000000	-0.1449%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0014741 %

### ข.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบคู่สัญญา 5 คู่สัญญา จึงมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ 5 เครื่อง แต่เราจะไม่พิจารณาบัส 13 ที่เป็นอ้างอิง เราจึงสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงไปของแรงดันที่โหลดบัส และกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 4 เครื่อง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังนี้

#### ข.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.31 และ ข.32

ตารางที่ ข.31 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951796	0.000354	0.000354	0.0143%
4	0.987588	0.987693	0.000105	0.000105	0.0714%
5	1.022219	1.022874	0.000655	0.000655	0.0079%
6	0.965039	0.965270	0.000232	0.000232	0.0319%
7	0.991748	0.991974	0.000226	0.000226	0.0261%
8	0.991242	0.991468	0.000226	0.000226	0.0261%
9	0.960242	0.960417	0.000176	0.000176	0.0286%
10	1.013973	1.014245	0.000272	0.000272	0.0233%
11	0.972669	0.972776	0.000107	0.000107	-0.0047%
12	0.988461	0.988566	0.000105	0.000105	-0.0059%
14	0.949203	0.949288	0.000085	0.000085	-0.0049%
15	0.997720	0.997769	0.000049	0.000049	-0.0059%
16	1.001970	1.002014	0.000044	0.000044	-0.0048%
17	1.034097	1.034112	0.000015	0.000015	-0.0017%

ตารางที่ ข.31 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 (ต่อ)

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
19	1.007722	1.007768	0.000045	0.000045	-0.0066%
20	1.010513	1.010560	0.000047	0.000047	-0.0087%
22	1.051527	1.051533	0.000006	0.000006	-0.0004%
23	1.010632	1.010679	0.000047	0.000047	-0.0099%
24	0.969943	0.970109	0.000166	0.000166	-0.0011%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0002232 %

ตารางที่ ข.32 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.003174	0.081533	0.081454	0.0969%
2	0.041986	-0.034643	-0.076629	-0.076629	0.0003%
18	0.649059	0.647981	-0.001078	-0.001078	-0.0005%
21	1.659453	1.657256	-0.002196	-0.002196	-0.0083%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0004861 %

### ข.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.33 และ ข.34



ตารางที่ ข.33 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951567	0.000125	0.000125	0.0454%
4	0.987588	0.988193	0.000605	0.000605	0.0106%
5	1.022219	1.022342	0.000123	0.000123	0.0393%
6	0.965039	0.965512	0.000474	0.000474	0.0074%
7	0.991748	0.991995	0.000247	0.000247	0.0185%
8	0.991242	0.991489	0.000247	0.000247	0.0185%
9	0.960242	0.960489	0.000248	0.000248	0.0179%
10	1.013973	1.014214	0.000242	0.000242	0.0180%
11	0.972669	0.972783	0.000114	0.000114	-0.0099%
12	0.988461	0.988574	0.000113	0.000113	-0.0112%
14	0.949203	0.949287	0.000085	0.000085	-0.0102%
15	0.997720	0.997746	0.000027	0.000027	-0.0080%
16	1.001970	1.002003	0.000032	0.000032	-0.0092%
17	1.034097	1.034108	0.000011	0.000011	-0.0056%
19	1.007722	1.007760	0.000037	0.000037	-0.0118%
20	1.010513	1.010555	0.000042	0.000042	-0.0142%
22	1.051527	1.051531	0.000004	0.000004	-0.0040%
23	1.010632	1.010676	0.000044	0.000044	-0.0154%
24	0.969943	0.970007	0.000064	0.000064	0.0063%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0001813 %

ตารางที่ ข.34 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า巴士ที่ 2

巴士ที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.161374	-0.076667	-0.076667	-0.0002%
2	0.041986	0.122247	0.080261	0.080183	0.0969%
18	0.649059	0.648265	-0.000793	-0.000793	-0.0041%
21	1.659453	1.658248	-0.001204	-0.001204	-0.0120%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0004886 %

### ข.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า巴士ที่ 18

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า巴士ที่ 18 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.35 และ ข.36

ตารางที่ ข.35 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ไหลบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า巴士ที่ 18

巴士ที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการประมาณเชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ปรับค่า	อัตราการเปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951566	0.000124	0.000124	-0.0061%
4	0.987588	0.987640	0.000051	0.000051	-0.0033%
5	1.022219	1.022254	0.000035	0.000035	0.0014%
6	0.965039	0.965099	0.000060	0.000060	-0.0029%
7	0.991748	0.991831	0.000084	0.000084	-0.0070%
8	0.991242	0.991326	0.000084	0.000084	-0.0070%
9	0.960242	0.960335	0.000093	0.000093	-0.0062%
10	1.013973	1.014045	0.000073	0.000073	-0.0060%
11	0.972669	0.972779	0.000110	0.000110	-0.0136%

ตารางที่ ข.35 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 18 (ต่อ)

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
12	0.988461	0.988533	0.000072	0.000072	-0.0147%
14	0.949203	0.949436	0.000233	0.000233	0.0001%
15	0.997720	0.997939	0.000219	0.000219	0.0083%
16	1.001970	1.002344	0.000374	0.000374	0.0050%
17	1.034097	1.034839	0.000742	0.000742	0.0010%
19	1.007722	1.008018	0.000296	0.000296	0.0046%
20	1.010513	1.010742	0.000229	0.000229	0.0037%
22	1.051527	1.051819	0.000292	0.000292	0.0010%
23	1.010632	1.010824	0.000192	0.000192	0.0029%
24	0.969943	0.970128	0.000185	0.000185	0.0127%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000701 %

ตารางที่ ข.36 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 18

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.085713	-0.001006	-0.001006	-0.0135%
2	0.041986	0.041257	-0.000730	-0.000730	0.0031%
18	0.649059	0.749758	0.100699	0.100604	0.0946%
21	1.659453	1.564247	-0.095206	-0.095205	0.0005%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0004783 %

### ข.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 21

กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 21 เท่ากับ 0.001 p.u. การเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ ข.37 และ ข.38

ตารางที่ ข.37 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่โหลดบัสเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 21

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
3	0.951441	0.951760	0.000318	0.000318	-0.0100%
4	0.987588	0.987674	0.000085	0.000085	-0.0092%
5	1.022219	1.022264	0.000045	0.000045	-0.0038%
6	0.965039	0.965116	0.000078	0.000078	-0.0081%
7	0.991748	0.991873	0.000126	0.000126	-0.0119%
8	0.991242	0.991368	0.000126	0.000126	-0.0119%
9	0.960242	0.960396	0.000155	0.000155	-0.0112%
10	1.013973	1.014067	0.000094	0.000094	-0.0109%
11	0.972669	0.972805	0.000136	0.000136	-0.0182%
12	0.988461	0.988556	0.000095	0.000095	-0.0191%
14	0.949203	0.949468	0.000265	0.000265	-0.0062%
15	0.997720	0.998370	0.000650	0.000650	-0.0013%
16	1.001970	1.002380	0.000410	0.000410	-0.0001%
17	1.034097	1.034289	0.000192	0.000192	0.0014%
19	1.007722	1.008049	0.000326	0.000326	-0.0008%
20	1.010513	1.010768	0.000254	0.000254	-0.0018%
22	1.051527	1.052217	0.000690	0.000690	-0.0002%
23	1.010632	1.010846	0.000215	0.000215	-0.0027%
24	0.969943	0.970469	0.000527	0.000527	-0.0005%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0000902 %

ตารางที่ ข.38 การเปรียบเทียบค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 21

บัสที่	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (p.u.)			อัตราการเปลี่ยนแปลง โดยการประมาณ เชิงเส้น (p.u.)	การเปรียบเทียบ ผลจาก 2 วิธี (เปอร์เซ็นต์)
	ระบบเดิม	ระบบที่ ปรับค่า	อัตราการ เปลี่ยนแปลง		
1	-0.084707	-0.086766	-0.002058	-0.002059	-0.0148%
2	0.041986	0.040901	-0.001085	-0.001085	-0.0037%
18	0.649059	0.554065	-0.094994	-0.094994	-0.0005%
21	1.659453	1.761551	0.102098	0.102002	0.0947%

ค่าความคลาดเคลื่อน = 0.0004798 %

จากผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณาจากวิธีการประมาณเชิงเส้นที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก ดังนั้น ผลการประมาณเชิงเส้นของพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นที่น่าพอใจและให้ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง เราจึงสามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาค่าความแออัดด้วยวิธีที่นำเสนอได้อย่างถูกต้อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายยุคฉรร บรเวทิง เกิดวันที่ 23 มิถุนายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2552



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย