

การศึกษาองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟเพื่อลดกำลังสูญเสีย



นายสมชาย เบียนสูงเนิน

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

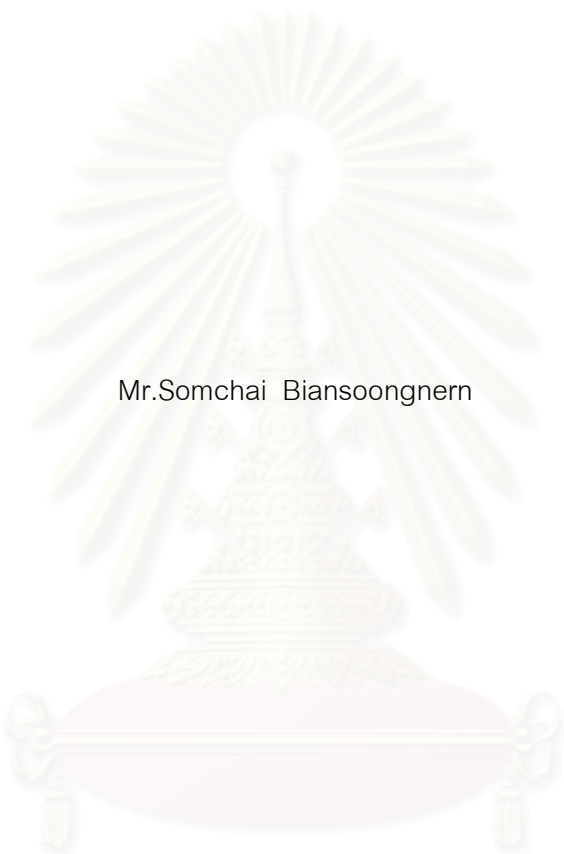
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1063-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF FACTORS RELATED TO REACTIVE POWER FOR POWER LOSS REDUCTION



Mr.Somchai Biansoongnern

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1063-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟเพื่อลดกำลังสูญเสีย
โดย	นายสมชาย เบ็ญนสูงเนิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ทรงศักดิ์ ชุษณพิพัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรวัชร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ทรงศักดิ์ ชุษณพิพัฒน์)

..... กรรมการ
(นายวุฒิชัย พึ่งประเสริฐ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมชาย เบียนสูงเนิน : การศึกษาองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟเพื่อลดกำลังสูญเสีย
(A STUDY OF FACTORS RELATED TO REACTIVE POWER FOR POWER LOSS
REDUCTION) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ทรงศักดิ์
ชุมชนพิพัฒน์ 95 หน้า. ISBN 974-53-1063-8.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการหาองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟเพื่อลดกำลัง
สูญเสียในระบบไฟฟ้า โดยการปรับตั้งค่าที่เหมาะสมของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ในกรณีที่โหลดคงที่
การหาค่าปรับตั้งเฉลี่ยที่ใช้กับโหลดที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา การเลือกอุปกรณ์ที่ปรับตั้ง การ
จัดลำดับอุปกรณ์ที่ปรับตั้งเพื่อพิจารณาผลของแรงดัน และการเพิ่มค่าเพื่อค่าปรับตั้งอุปกรณ์ที่ต้องมี
เหลือใช้ในกรณีที่จำเป็น การคำนวณออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์ใช้วิธีการอินทิเรียพอยน์ด โดยทดสอบ
กับระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการลดลงของกำลังสูญเสียเมื่อ
ปรับค่าที่เหมาะสม สามารถควบคุมให้เพิ่มค่าเพื่อของอุปกรณ์ปรับตั้งเพื่อใช้ในกรณีที่ระบบมีปัญหา
สมการที่นำเสนอสามารถระบุตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ใหม่เพื่อลดกำลังสูญเสียได้อย่างเหมาะสม ใน
กรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงตามเวลาการนำค่าโหลดในแต่ละช่วงเวลามาพิจารณาคำนวณหาค่าปรับตั้งร่วมด้วย
ทำให้กำลังสูญเสียลดลงและแรงดันอยู่ในขีดจำกัดที่ต้องการ และสามารถเลือกอุปกรณ์ปรับตั้งที่ส่งผล
ต่อการลดลงของกำลังสูญเสีย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____
สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา _____ 2547 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

447-05790-21 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTIMAL POWER FLOW / POWER LOSS REDUCTION / FACTS DEVICES / REACTIVE POWER MARGINS

SOMCHAI BIANSOONGNERN : A STUDY OF FACTORS RELATED TO REACTIVE POWER FOR POWER LOSS REDUCTION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF SUKUMVIT PHOOMVUTHISARN,Ph.D THESIS COADVISOR : SONGSAK CHUSANAPIPUTT,D.Eng 95 pp. ISBN 974-53-1063-8.

This thesis presents the factors related to reactive power for power loss reduction by calculation the optimal adjustment of devices. For constant load, average adjustment when be used with daily load, selected of devices for adjustment when load change, order of control adjustment to consider of voltage profile, increase the control variables margin to used when system have a problem. Algorithm for optimal power flow to calculate optimal control variables is based on interior point method. The proposed methods has been tested with the standard IEEE test systems. The obtained results demonstrate that the power loss is reduced when control variables have been in optimal adjustment. The variables margin can be increased. Equations that presented can find the optimal location of device to reduced power loss. To used more than one level of load to find optimal variables can be reduced power loss. The control devices can be selected to have more effect of reduction power loss.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature _____.

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature _____.

Academic year 2004 Co-advisor's signature _____.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีมาตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์ และคุณวุฒิชัย พิงประเสริฐ ที่ได้สละเวลาในการตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและแนวเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
2 หลักการพื้นฐานระบบไฟฟ้า.....	5
2.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐาน.....	5
2.1.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	5
2.1.2 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้า.....	6
2.1.3 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ป.....	6
2.1.4 แบบจำลองตัวเก็บประจุ.....	7
2.2 แบบจำลองโหลด.....	8
2.3 เทคโนโลยี FACTS.....	8
2.3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ประเภท FACTS.....	10
2.3.1.1 อุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Compensators.....	10
2.3.1.2 อุปกรณ์ Static Var Compensator.....	13
2.3.1.3 อุปกรณ์ Unified Power Flow Controlled.....	15
2.4 สมการกำลังไฟฟ้า.....	17
2.4.1 สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้า.....	17
2.4.2 สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	17

บทที่	หน้า
2.4.3 สมการจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง.....	19
2.4.3.1 สายที่ไม่มีอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม.....	20
2.4.3.2 สายที่ติดตั้งหม้อแปลง.....	20
2.4.3.3 สายที่ติดตั้ง TCSC.....	21
2.4.3.4 สายที่ติดตั้ง UPFC.....	22
2.5 สมการกำลังสูญเสีย.....	23
2.6 สมการเพาเวอร์โฟลว์.....	24
3 การวิจัยองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟ.....	27
3.1 สมการออฟติมอลเพาเวอร์โฟลว์.....	27
3.2 หลักวิธีอินทิเกรตพอยนท์.....	29
3.3 เสถียรภาพของแรงดัน.....	33
3.4 การเพิ่มค่าเพื่อของอุปกรณ์ควบคุม.....	35
3.4.1 การเพิ่มค่าเพื่อกำลังไฟฟารีแอกตีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	35
3.4.2 การเพิ่มค่าเพื่อกำลังรีแอกตีฟจากตัวเก็บประจุหรือ SVC.....	36
3.4.3 การเพิ่มค่าเพื่อจำนวนชั้นของแท็ปหม้อแปลง.....	37
3.5 การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์เพิ่มเติม.....	39
3.5.1 การจัดลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุและ SVC.....	39
3.5.2 การจัดลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมของ TCSC.....	41
3.5.3 การจัดลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมของ UPFC.....	43
4. การวิเคราะห์ค่าปรับตั้งตามช่วงเวลา.....	44
4.1 การปรับตั้งตัวแปรควบคุมคงที่ตลอดช่วงเวลา.....	44
4.2 การปรับตั้งตัวแปรควบคุมเปลี่ยนตามช่วงเวลา.....	45
4.2.1 ความถี่ในการปรับตั้งตัวแปรควบคุม.....	46
4.2.2 จำนวนอุปกรณ์ที่จะปรับเปลี่ยนในช่วงเวลา.....	46
4.2.3 ลำดับขั้นการปรับอุปกรณ์ที่ต่างชนิด.....	47
5. ตัวอย่างการวิเคราะห์องค์ประกอบของการลดกำลังสูญเสีย.....	48
5.1 การทดสอบการทำงานของโปรแกรมการคำนวณออฟติมอลเพาเวอร์โฟลว์.....	48
5.2 ผลการวิเคราะห์ดัชนีบ่งชี้ความมีเสถียรภาพของแรงดัน.....	51
5.3 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่ออุปกรณ์.....	53

บทที่	หน้า
5.3.1 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	53
5.3.2 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่อตัวเก็บประจุหรือ SVC.....	55
5.3.3 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่อจำนวนชั้นของแท่งหม้อแปลง.....	58
5.4 ตัวอย่างการทดสอบการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม.....	60
5.4.1 ผลการทดสอบหาจุดติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับตัวเก็บประจุหรือSVC.....	60
5.4.2 ผลการทดสอบหาจุดติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับ TCSC.....	63
5.4.2 ผลการทดสอบหาจุดติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับ UPFC.....	66
5.5 การทดสอบปรับตั้งอุปกรณ์ตามช่วงเวลา.....	67
5.5.1 การทดสอบหาค่าปรับตั้งคงที่ตลอดช่วงเวลา.....	68
5.5.2 การทดสอบการปรับตั้งอุปกรณ์ตามช่วงเวลา.....	69
5.5.3 ผลการทดสอบเลือกอุปกรณ์ที่จะปรับตั้ง.....	71
5.5.4 ผลทดสอบการจัดลำดับการปรับตั้งอุปกรณ์.....	74
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ตารางแสดงกำลังสูญเสียของระบบทดสอบ.....	48
5.2 ตารางแสดงจำนวนแรงดันบัลท์ที่อยู่นอกขอบเขต.....	49
5.3 ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของ โปรแกรม.....	49
5.4 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อปรับค่า L_{max}	51
5.5 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อ $\beta=0, \beta=1$ และ $SRM^{max}=10\%$	55
5.6 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อ $\alpha=0, \alpha=1$ และ $SBM^{max}=10\%$	57
5.7 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อ $\gamma=0, \gamma=1$ และ $STM^{max}=10\%$	59
5.8 ตารางแสดงดัชนีตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุหรือ SVC.....	61
5.9 ตารางแสดงกำลังสูญเสียและขนาดตัวเก็บประจุหรือ SVC เมื่อติดตั้ง 1 จุด.....	61
5.10 ตารางแสดงกำลังสูญเสียและขนาดตัวเก็บประจุหรือ SVC เมื่อติดตั้ง 2 จุด.....	62
5.11 ตารางแสดงดัชนีตำแหน่งติดตั้ง TCSC.....	64
5.12 ตารางแสดงกำลังสูญเสียและขนาดของ TCSC เมื่อติดตั้ง 1 จุด.....	64
5.13 ตารางแสดงกำลังสูญเสียและขนาดของ TCSC เมื่อติดตั้ง 2 จุด.....	65
5.14 ตารางแสดงดัชนีตำแหน่งติดตั้ง UPFC.....	66
5.15 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อติดตั้ง UPFC 1 จุด.....	66
5.16 ตารางแสดงตัวคูณ โหลดตามช่วงเวลา.....	67
5.17 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันเมื่อใช้ค่าปรับตั้งที่ต่างกัน.....	68
5.18 ตารางแสดงจำนวนครั้งที่แรงดันเกินพิกัด(รวมทุกบัลท์).....	68
5.19 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันเมื่อใช้ค่าปรับตั้งที่ต่างกัน.....	70
5.20 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ชนิดละ 1 ตัว ของระบบ IEEE 14 บัลท์.....	72
5.21 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ชนิดละ 1 ตัว ของระบบ IEEE 30 บัลท์.....	72
5.22 ตารางแสดงกำลังสูญเสียเมื่อเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ชนิดละ 1 ตัว ของระบบ IEEE 57 บัลท์.....	73
5.23 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน.....	74
5.24 ตารางจำนวนแรงดันที่เกินขอบเขต.....	75
5.25 ตารางแสดงจำนวนแรงดันที่เกินขอบเขตเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาปรับตั้ง.....	75
5.26 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน.....	76

ตารางที่	หน้า
ก.1 ตารางแสดงข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	82
ก.2 ตารางแสดงข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	83
ก.3 ตารางแสดงข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	84
ก.4 ตารางแสดงข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	85
ก.5 ตารางแสดงข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส.....	87
ก.6 ตารางแสดงข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส.....	89



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	5
2.2 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้าแบบ π	6
2.3 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ป.....	6
2.4 แบบจำลองสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	7
2.5 แบบจำลองตัวเก็บประจุ.....	7
2.6 แบบจำลองของโหลดคงที่.....	8
2.7 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบโครงข่ายตัวอย่าง.....	9
2.8 การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่ายตัวอย่าง.....	9
2.9 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าที่สาย 1-3.....	10
2.10 การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่ายตัวอย่างเมื่อ ติดตั้งอุปกรณ์ FACTS.....	10
2.11 แผนภาพแบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC.....	11
2.12 แบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC.....	11
2.13 กราฟแสดงคุณสมบัติของ TCSC.....	12
2.14 แผนภาพแบบจำลองของอุปกรณ์ SVC.....	13
2.15 แบบจำลองโครงสร้างของอุปกรณ์ SVC.....	13
2.16 กราฟแสดงคุณสมบัติของ SVC.....	14
2.17 แผนภาพแบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC.....	15
2.18 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC.....	15
2.19 การไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส.....	17
3.1 แผนภาพการหาค่าผลเฉลยสมการไม่เชิงเส้นโดยวิธีอินทิเกรตย้อนกลับ.....	33
3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่บัส (PV Curve).....	34
4.1 กราฟความต้องการการใช้กำลังไฟฟ้า(Daily Load Demand).....	44
5.1 ผลการทดสอบกำลังสูญเสียของโปรแกรมออฟติไมเซอร์โพลี.....	50
5.2 ระดับแรงดันที่บัส.....	52
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟ.....	53
5.4 ค่าปรับตั้งกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	55
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อชฟแซฟแดนซ์.....	56
5.6 ค่าชฟแซฟแดนซ์ของตัวเก็บประจุ.....	57

ภาพประกอบที่	หน้า
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง γ กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเฟื้อขึ้นแท็ปหม้อแปลง.....	58
5.8 อัตราส่วนแท็ปหม้อแปลง.....	60
5.9 ค่าความต่างกำลังสูญเสียเทียบกับกรณีการทดสอบติดตั้ง.....	63
5.10 ค่าความต่างกำลังสูญเสียเทียบกับกรณีที่ทดสอบติดตั้งโดยตรง.....	65
5.11 ค่าความต่างของกำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันที่เทียบกับกรณีที่ 1	69
5.12 ค่าความต่างของกำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันที่เทียบกับกรณีที่ 1.....	71
5.13 ผลต่างกำลังสูญเสียเมื่อเทียบกับกรณีที่ปรับตั้งทุกตัว.....	73
ก.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	82
ก.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	84
ข.1 ผลการทดสอบแรงดันของออฟติมอลเพาเวอร์โฟลว์.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแนวเหตุผล

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญยิ่งสำหรับหน่วยงานที่ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้าและจำหน่ายไฟฟ้า การจัดการกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบให้ต่ำที่สุดเป็นแนวทางหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า แต่การลดกำลังสูญเสียจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขอื่นที่ระบบต้องการ เช่น ระดับแรงดัน หรือความมั่นคงของระบบ ดังนั้นการจัดการกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้มีค่าต่ำที่สุดจะต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆประกอบด้วย จึงจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งจ่ายที่สมบูรณ์

พลังงานไฟฟ้าถูกส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยผ่านระบบส่ง (Transmission System) และระบบจำหน่าย(Distribution System) การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านี้ทำให้เกิดกำลังสูญเสีย(Power Losses) และแรงดันตกในสาย เนื่องจากความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น และผู้ใช้ไฟฟ้าอยู่กระจายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า[1] ทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งมีค่ามากขึ้นตาม อีกทั้งแรงดันตกในสายมากขึ้นทำให้ระดับแรงดันอาจอยู่นอกย่านที่เหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อปรับตั้งค่าต่างๆของระบบให้กำลังสูญเสียน้อยลงในแต่ละระดับโหลด และพร้อมทั้งต้องปรับปรุงค่าของแรงดันให้มีเสถียรภาพ การลดกำลังสูญเสียในระบบนอกจากจะลดค่าใช้จ่ายของพลังงานที่สูญเสียไปแล้วยังเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดแทนส่วนที่ลดลงของกำลังสูญเสีย ส่วนการรักษาระดับแรงดันให้มีค่าที่เหมาะสมก็จะช่วยลดความเสี่ยงที่จะทำให้แรงดันไม่มีเสถียรภาพ อันจะส่งผลให้ระบบบางส่วนต้องขาดไฟฟ้า ซึ่งก็จะกระทบต่อการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภค

ประเด็นที่จะต้องนำมาพิจารณาคือการหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังสูญเสียน้อยลงมากที่สุด โดยรวมพิจารณาเงื่อนไขอื่นๆ ที่ระบบต้องการประกอบไปพร้อมกัน เช่น ระบบต้องมีค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดเพื่อใช้ปรับในกรณีที่มีปัญหาบัพทรวงในระบบ[2] ดังนั้นในการปรับตั้งค่ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดต้องไม่ปรับเพื่อการลดกำลังสูญเสียด้านเดียว ส่วนการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มอาจต้องพิจารณาเรื่องเงินลงทุนหรือมุ่งเน้นการปรับระดับแรงดันให้ได้พิกัดที่เหมาะสม เพราะถ้าแรงดันไม่เสถียรภาพจะทำให้เกิดความเสียหายมากกว่าเงินลงทุนขั้นต้นนั้นเป็นองค์ประกอบบางส่วนที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบด้วย

เมื่อระบบผ่านขบวนการจัดสรรกำลังผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงเรียบร้อยแล้ว จากนั้นการลดกำลังสูญเสียจึงมุ่งไปที่การลดกำลังสูญเสียกับค่าที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกทีฟ[3] และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นอุปกรณ์หรือค่าปรับตั้งจะต้องสัมพันธ์กับแนวทางดังกล่าว ซึ่งค่าปรับตั้งที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกทีฟ ได้แก่ แรงดันที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการปรับตั้งค่ากำลังรีแอกทีฟ ตัวเก็บประจุ หม้อแปลงแบบปรับแท็ปได้ และอุปกรณ์ประเภท FACTS (Flexible AC Transmission System) ซึ่งมีแบบที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟ และแบบที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า[4] และเนื่องด้วยการเพิ่มหรือปรับตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นการช่วยรักษาระดับแรงดันด้วย เพราะแรงดันในระบบไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับกำลังรีแอกทีฟ นอกจากการปรับแรงดันให้อยู่ในย่านที่ต้องการแล้ว ต้องการตรวจสอบด้วยว่าแรงดันที่บัสนั้นๆอยู่ใกล้กับค่าที่ทำให้แรงดันไม่เสถียรภาพหรือไม่ นั่นหมายถึงว่าต้องมีดัชนีที่จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าระดับแรงดันอยู่ในระดับดัชนีที่ต้องการ

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงเป็นที่นิยมมากกว่าอดีต เพราะเครื่องคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาให้มีทั้งประสิทธิภาพ ความเร็วและหน่วยความจำมากขึ้นตอบสนองระบบไฟฟ้าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน การหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณหาค่าปรับตั้งของอุปกรณ์และปริมาณต่างๆของระบบไฟฟ้าให้มีค่าเหมาะสม เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังและทำให้แรงดันอยู่ในพิสัยที่ต้องการ อีกทั้งยังจะทำให้การวางแผนและการปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมุ่งทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมที่มีอยู่แล้วในระบบและอุปกรณ์เพิ่มเติม ได้แก่ ตัวเก็บประจุ และอุปกรณ์ประเภท FACTS พร้อมทั้งพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ พิจารณาค่าเผื่อของอุปกรณ์ปรับตั้ง และลำดับขั้นการปรับตั้งของอุปกรณ์ เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังและทำให้แรงดันมีเสถียรภาพทั้งขณะที่ปรับตั้งอุปกรณ์แต่ละชนิด และหลังการปรับตั้งอุปกรณ์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกทีฟเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า
2. เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ในการคำนวณค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง
3. เพื่อใช้เป็นแหล่งอ้างอิงพื้นฐานสำหรับการศึกษาระดับสูงต่อไป

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังแบบสมดุล 3 เฟสในสภาวะการทำงานอยู่ตัว
2. พิจารณาโหลดแบบกำลังไฟฟ้าคงที่
3. พิจารณาค่าเผื่อกำลังรีแอกตีฟของเครื่องกำเนิด ตัวเก็บประจุ และแท็ปหม้อแปลง
4. พิจารณาจัดลำดับการปรับตั้งอุปกรณ์แต่ละชนิด
5. อุปกรณ์ FACTS ใช้ SVC, TCSC และ UPFC

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาสาเหตุแห่งปัญหาที่ก่อให้เกิดการทำวิทยานิพนธ์
 - 1.2 ศึกษาแนวทางแก้ไข วิธีการประเมิน และขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์
 - 1.3 ศึกษาและประเมินแผนงาน ระยะเวลา อุปสรรค และแนวทางแก้ไขในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์
 - 2.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลัง
 - 2.2 ศึกษาทฤษฎี กระบวนวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น ขบวนการหาผลตอบที่เหมาะสม
 - 2.3 ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม
 - 2.4 ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการลดกำลังสูญเสีย โดยพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแต่ละชนิด
 - 2.5 ศึกษาคุณลักษณะของเสถียรภาพของแรงดัน
3. วิจัยและพัฒนา
 - 3.1 พัฒนาและออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า
 - 3.2 ทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับข้อมูลมาตรฐาน เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟเพื่อการลดกำลังสูญเสีย
 - 3.3 วิเคราะห์และสรุปผล
4. เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบผลกระทบขององค์ประกอบต่างๆ ต่อการลดกำลังสูญเสีย เพื่อใช้ตัดสินใจในการวางแผนและปฏิบัติงานในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. โปรแกรมช่วยคำนวณค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า
3. ทราบผลของเสถียรภาพแรงดันต่อการลดกำลังสูญเสีย เพื่อใช้ปรับตั้งดัชนีของเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม
4. สามารถหาจุดที่เหมาะสมเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ใหม่เพื่อลดกำลังสูญเสีย
5. สามารถจัดลำดับการปรับตั้งของอุปกรณ์ที่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระดับกว้าง
6. นำโปรแกรมไปประยุกต์ในกรณีที่ต้องการควบคุมแบบ Real-time ได้

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอหลักการพื้นฐานระบบไฟฟ้า ได้แก่ แบบจำลองพื้นฐานของระบบไฟฟ้า แบบจำลองโหลด แบบจำลองอุปกรณ์ปรับตั้งเพิ่มเติม สมการกำลังไฟฟ้า และสมการกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้า

บทที่ 3 นำเสนอหัวข้อการวิจัยขององค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟ กระบวนการหาค่าปรับตั้งให้ได้ค่าที่เหมาะสมและเป็นจริงสำหรับระบบไฟฟ้า โดยจะกล่าวถึงหลักการออฟติมอลเพาเวอร์เวอร์โพล์และอัลกอริทึมที่จะแก้ปัญหา เพื่อดูผลกระทบต่อการลดลงของกำลังสูญเสียอันได้แก่ เสถียรภาพแรงดัน ค่าเผื่อของอุปกรณ์ควบคุม การเพิ่มอุปกรณ์เพิ่มเติมและหาจุดติดตั้งที่เหมาะสม

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์ค่าปรับตั้งตามช่วงเวลา โดยพิจารณาการปรับตั้งตัวแปรของอุปกรณ์ตามการเปลี่ยนของโหลดตามช่วงเวลา เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้ง ทั้งแบบปรับตั้งคงที่ตลอดช่วงเวลา และแบบปรับเปลี่ยนค่าปรับตั้งเป็นลำดับตามช่วงเวลา

บทที่ 5 นำเสนอตัวอย่างการวิเคราะห์ห่องค์ประกอบของการลดกำลังสูญเสีย เช่น ตัวอย่างผลของการเพิ่มค่าเผื่ออุปกรณ์ การหาค่าปรับตั้งเมื่อโหลดเปลี่ยนตามค่าเวลา เป็นต้น

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานระบบไฟฟ้า

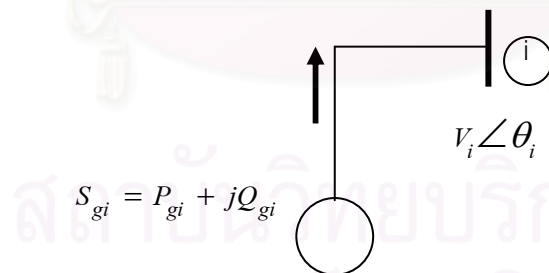
กำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าขึ้นอยู่กับโครงสร้างและค่าปรับตั้งต่างๆของระบบ ดังนั้นการศึกษาลดกำลังสูญเสียจึงต้องทราบถึงส่วนประกอบพื้นฐานที่มีอยู่ในระบบ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง และหม้อแปลง เป็นต้น อีกทั้งยังต้องเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังก่อนที่จะทำการปรับตั้งเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า โดยในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองพื้นฐานของระบบไฟฟ้า แบบจำลองโหลด แบบจำลองอุปกรณ์ปรับตั้งเพิ่มเติม สมการกำลังไฟฟ้า และสมการกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้า

2.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐาน[5]

แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าถือว่ามีความสำคัญมาก เพราะถ้าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับงานที่ต้องการคำนวณก็จะได้ผลที่แม่นยำ โดยในที่นี้การสร้างแบบจำลองจะพิจารณาให้สอดคล้องกับสมการที่จะหาค่าปรับตั้งเพื่อลดกำลังสูญเสีย

2.1.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตเท่ากับ $S_{gi} = P_{gi} + jQ_{gi}$ แทนด้วยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัส แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อ P_{gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดที่บัส i

Q_{gi} คือ กำลังไฟฟ้รีแอกตีฟของเครื่องกำเนิดที่บัส i

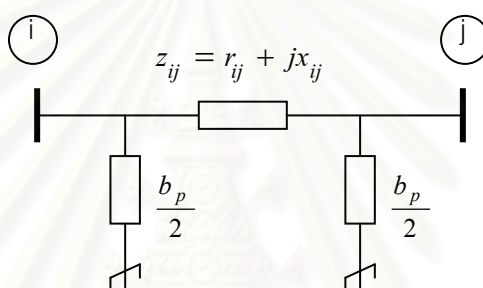
$V_i \angle \theta_i$ คือ แรงดันและมุมที่บัส i

2.1.2 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้า

สายส่งไฟฟ้าแทนด้วยแบบจำลองสมมูลแบบ π ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส i และบัส j เป็น $z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$ และค่าชั้้นท์แอดมิตแตนซ์เท่ากับครึ่งหนึ่งของไลน์ชาร์จิจึงแอดมิตแตนซ์ b_c แต่การคำนวณจะใช้ค่าแอดมิตแตนซ์แทนค่าอิมพีแดนซ์โดยเปลี่ยนตามสมการที่ (2.1) และแบบจำลองของสายส่งแสดงดังรูปที่ 2.2

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (2.1)$$

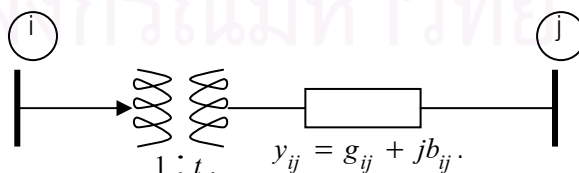
$$\text{โดยที่ } g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \text{ และ } b_{ij} = -\frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}$$



รูปที่ 2.2 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้าแบบ π

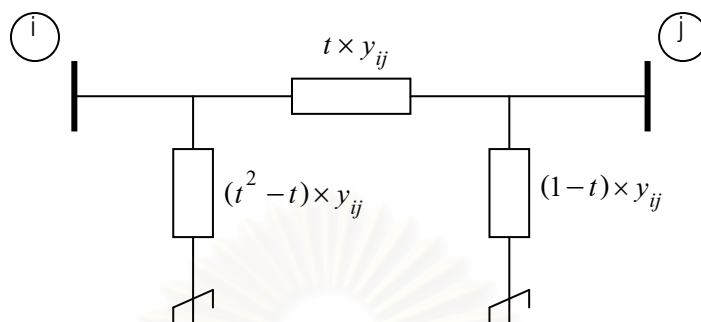
2.1.3 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ป

การปรับแรงดันให้ได้ค่าที่ต้องการโดยการปรับค่ากำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟที่กระจายไหลในระบบทำได้โดยการปรับแท็ปของหม้อแปลง ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนขงแท็ปเป็น $1:t$ และมีค่าแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลงที่ต่อระหว่างบัส i และ j คือ $y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ สามารถแทนแบบจำลองของหม้อแปลงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ป

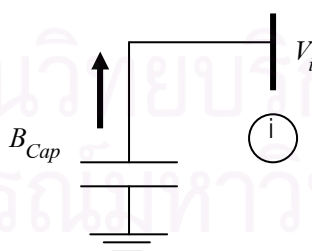
เพื่อให้การคำนวณกำลังไฟฟ้าเป็นไปในรูปแบบที่เหมือนกับสายส่ง สามารถเขียนแทนหม้อแปลงด้วยแบบจำลองสมมูลแบบ π ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1.4 แบบจำลองตัวเก็บประจุ

การประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าเพื่อเหตุผล 2 ประการ คือปรับระดับแรงดันและลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า โดยหน้าที่หลักของตัวเก็บประจุคือการจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบดังแสดงแบบจำลองตามรูปที่ 2.5 ทำให้กระแสที่ไหลในสายเพื่อจ่ายให้กับโหลดลดลงเนื่องจากกระแสส่วนที่เป็นรีแอกทีฟบางส่วนได้มาจากตัวเก็บประจุ และส่งผลทำให้กำลังสูญเสียจาก I^2R ลดลงตามด้วย แรงดันที่ตกในสายลดลงทำให้แรงดันที่ต้นสายกับปลายสายมีค่าไม่ต่างกันมาก ตัวเก็บประจุจะถูกจำลองในรูปของค่าชัฟแฟแดนซ์คงที่ค่าหนึ่ง และกำลังรีแอกทีฟที่คำนวณในระบบจะแปรตามกำลังสองของแรงดันที่บัสตามสมการที่ (2.3)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองตัวเก็บประจุ

ค่าชัฟแฟแดนซ์ของตัวเก็บประจุคำนวณได้จาก

$$B_{Cap} = \frac{Q_{CS}}{V_{CS}^2} \quad (2.2)$$

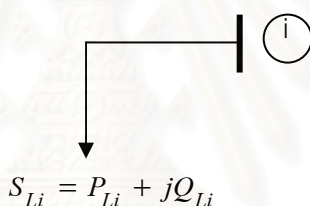
กำลังรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเขียนได้สมการที่ 2.3

$$Q_c = B_{Cap} \times V_i^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ Q_c คือ กำลังรีแอกทีฟ
 Q_{cs}, V_{cs} คือ กำลังรีแอกทีฟและแรงดันที่พิกัดของตัวเก็บประจุ
 B_{Cap} คือ ซีสเซฟแตนซ์ของตัวเก็บประจุ
 V_i คือ แรงดันที่ ณ บัสที่ตัวเก็บประจุต่ออยู่

2.2 แบบจำลองโหลด

โหลดคงที่ถูกแทนได้ด้วยแบบจำลองของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีขนาดคงที่[6] แบบจำลองของโหลดแสดงดังรูปที่ 2.6



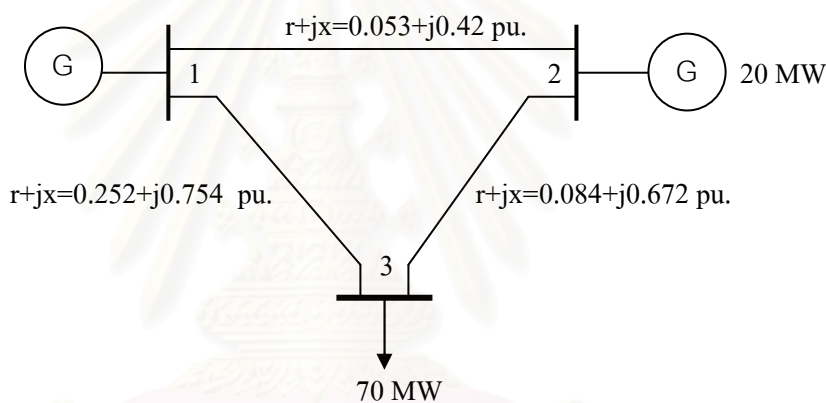
รูปที่ 2.6 แบบจำลองของโหลดคงที่

โหลดที่มีขนาดเท่ากับ $S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$ จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับการแรงดันบัส

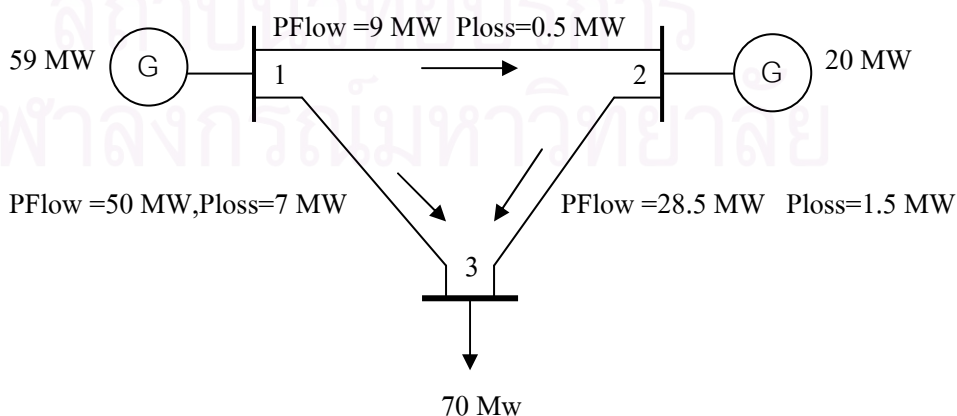
2.3 เทคโนโลยี FACTS (Flexible AC Transmission Systems)

การพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้มีการนำอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้งานในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมตัวแปรต่างๆของสายส่งด้วยคุณสมบัติพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วและทำงานได้อย่างยืดหยุ่นทำให้เกิดเทคโนโลยี FACTS โดยแนวความคิดเกี่ยวกับเทคโนโลยี FACTS ได้เกิดขึ้นครั้งแรกโดยการนำเสนอของ N.Hingorani จากสถาบันวิจัย Electric Power Research Institute (EPRI) ตั้งแต่ ค.ศ. 1988 ซึ่งได้อธิบายแนวคิดของเทคโนโลยี FACTS ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังให้มีความสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในปริมาณและทิศทางที่ต้องการ โดยในส่วนของ การลดกำลังสูญเสียก็สามารถที่จะนำอุปกรณ์ชนิดนี้มาควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้มีปริมาณและทิศทางที่จะทำให้กำลังสูญเสียลดลง

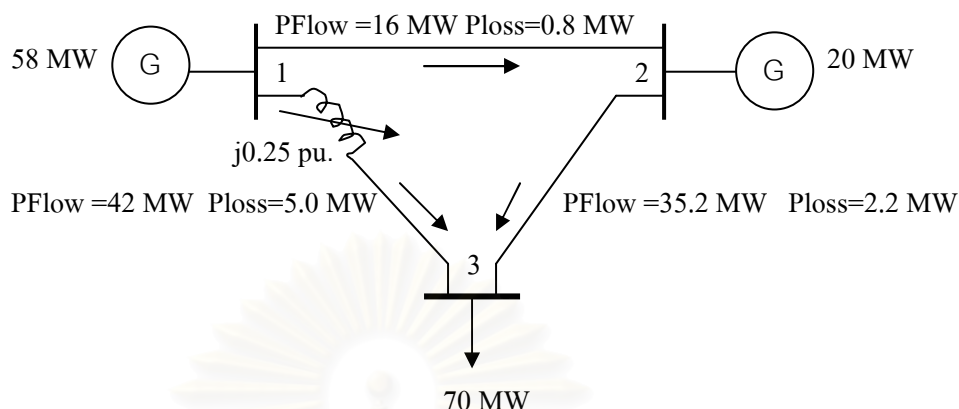
พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังแบบ โครงข่ายตัวอย่างดังรูปที่ 2.7 กำหนดให้แหล่งจ่ายที่บัส 2 จ่ายกำลังไฟฟ้า 20 MW คงที่ตลอด เมื่อไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมใดๆ การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างอิสระแสดงดังรูปที่ 2.8 การติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ซึ่งในที่นี้จะทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งจากระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง การไหลของกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนปริมาณเพื่อให้กำลังไฟฟ้าไหลในทิศทางที่ทำให้กำลังสูญเสียรวมลดลง รูปที่ 2.9 เป็นการต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าที่สาย 1-3 เมื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้มีขนาด $j0.25$ pu. ก็จะทำให้กำลังสูญเสียลดลง 1 MW เช่นเดียวกับรูปที่ 2.10 ที่ปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้มีขนาด $-j0.3$ pu. ก็จะทำให้กำลังสูญเสียลดลง 1 MW แต่ขนาดที่จะปรับตั้งจะต้องเป็นค่าที่เหมาะสมไม่ใช่ว่ายิ่งปรับมากจะทำให้กำลังสูญเสียลดลง จากการติดตั้งจะเห็นว่าค่าที่ปรับตั้งจะไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งที่ติดตั้ง ดังนั้นถ้าติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมผลของการลดกำลังสูญเสียก็จะมีผลน้อย



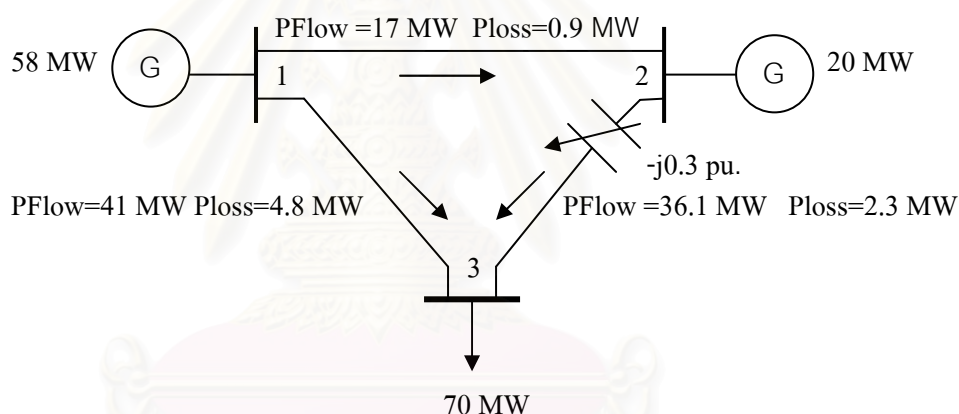
รูปที่ 2.7 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบ โครงข่ายตัวอย่าง



รูปที่ 2.8 การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบ โครงข่ายตัวอย่าง



รูปที่ 2.9 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าที่สาย 1-3



รูปที่ 2.10 การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่ายตัวอย่างเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ FACTS

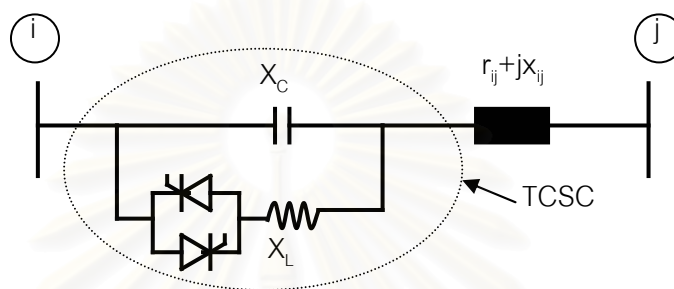
2.3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ประเภท FACTS

อุปกรณ์ประเภท Flexible AC Transmission Systems (FACTS) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบจากอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยชนิดของอุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกออกแบบให้ควบคุมตัวแปรต่างๆของระบบไฟฟ้า อันได้แก่ ควบคุมค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ควบคุมแรงดันที่บัส และควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า แต่ละชนิดมีแบบจำลองดังนี้

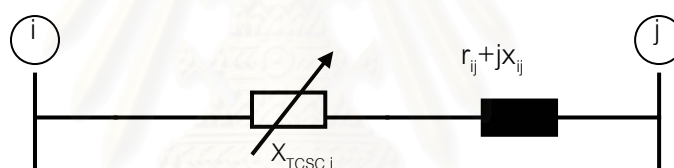
2.3.1.1 อุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Compensators (TCSC)[7]

TCSC เป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมที่ควบคุมรีแอกแตนซ์ที่สายส่ง โดยจะติดตั้งอนุกรมกับสายส่งควบคุมรีแอกแตนซ์โดยควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ โครงสร้างมีหลาย

รูปแบบแต่ที่นิยมจะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดคงที่ต่อขนานกับรีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์(Fixed Capacitor and Thyristor-Controlled Reactor) เรียกอุปกรณ์ TCSC แบบโครงสร้างนี้ว่าเป็น อุปกรณ์ TCSC ชนิด FC-TCR โดยที่ TCSC จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มหรือลดความยาวของสายส่งได้โดยการปรับเพิ่มหรือลดค่ารีแอคเตอร์ X_{TCSC} วงจรสมมูลจำลองแสดงดังรูปที่ 2.11 และเขียนวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แผนภาพแบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC



รูปที่ 2.12 แบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC

แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.11 และเขียนวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.12

โดยที่ X_C คือ คาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของ FC

X_L คือ อินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของ TCR

รีแอคแตนซ์สมมูลของ TCR (X_{Leq}) แสดงดังสมการที่ (2.4)

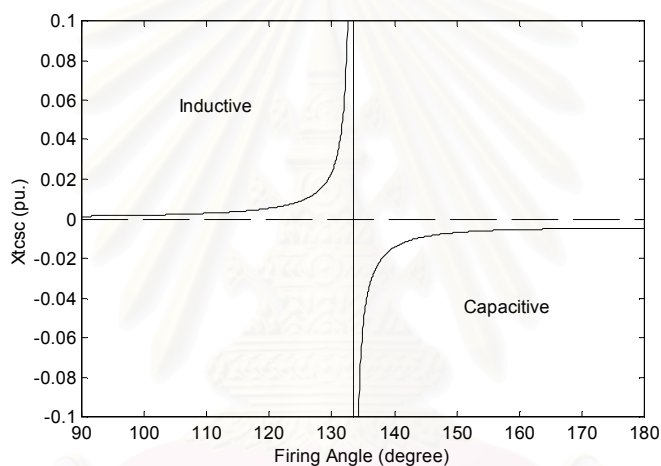
$$X_{Leq} = \frac{\pi X_L}{\sin 2\alpha + 2(\pi - \alpha)} \quad (2.4)$$

โดยที่ α เป็นมุมจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์

การปรับมุมจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ X_{Leq} เปลี่ยน และจะได้รีแอคแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC (X_{TCSC}) แสดงดังสมการที่ (2.5)

$$X_{TCSC} = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] - X_L} \quad (2.5)$$

ค่าของ X_{TCSC} จะมีความต่อเนื่องโดยขึ้นอยู่กับค่ามุมจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ ถ้าปรับมุมจาก 90 องศา ถึง 180 องศา และกำหนดให้ X_C มีค่า 0.005 pu. และ X_L มีค่า 0.001 pu. ได้กราฟตามรูปที่ 2.13 ที่มุมประมาณ 133.4 องศาเป็นมุมที่แบ่งคุณสมบัติของ TCSC นั้นคือถ้ามุมจุดชนวนที่มุมระหว่าง 90-133.4 องศา เป็นคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ และที่มุมระหว่าง 133.4-180 องศา เป็นคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ มุมที่แบ่งคุณสมบัตินี้ก็จะขึ้นอยู่กับค่าของ X_C และ X_L



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงคุณสมบัติของ TCSC

สมการของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายที่ติดตั้ง TCSC แสดงดังสมการที่ (2.6)-(2.7)

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (2.6)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (2.7)$$

เมื่อ

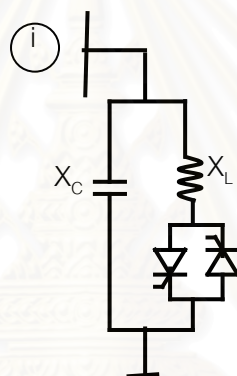
$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_{TCSC})^2}, \quad b_{ij} = -\frac{x_{ij} + x_{TCSC}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_{TCSC})^2}$$

โดยที่ g_{ij} คือค่าคอนดักแตนซ์ระหว่างบัส i และ j

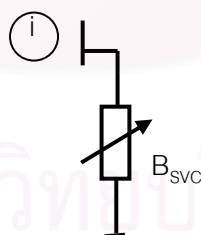
b_{ij} คือค่าซัสเซพแตนซ์ระหว่างบัส i และ j

2.3.1.2 อุปกรณ์ Static Var Compensator (SVC)[8]

ระดับของแรงดันไฟฟ้าเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องควบคุมเพราะเมื่อความต้องการพลังงานมากก็จะทำให้แรงดันที่ปลายสายลดลง หรือเมื่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าน้อยก็อาจจะทำให้แรงดันสูงขึ้น โดยการควบคุมจะเป็นการควบคุมมุมจุดชนวนเกตที่ไทรสเตอร์ส่งผลให้ค่าชั้สเซฟแตนซ์เปลี่ยนแปลง โดยถ้าแรงดันต่ำเกินไปก็ปรับค่าให้เป็นแบบคาปาซิทีฟชั้สเซฟแตนซ์เพื่อใช้ปรับระดับแรงดันให้เพิ่มขึ้น หรือถ้าแรงดันสูงก็ปรับค่าให้เป็นแบบอินดักทีฟชั้สเซฟแตนซ์ โครงสร้างของ SVC จะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดคงที่ต่อขนานกับรีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์(Fixed Capacitor and Thyristor-Controlled Reactor) เรียกอุปกรณ์ SVC แบบโครงสร้างนี้ว่าเป็น อุปกรณ์ SVC ชนิด FC-TCR



รูปที่ 2.14 แผนภาพแบบจำลองของอุปกรณ์ SVC



รูปที่ 2.15 แบบจำลองโครงสร้างของอุปกรณ์ SVC

แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.14 และเขียนวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.15

โดยที่ X_C คือ คาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของ FC

X_L คือ อินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของ TCR

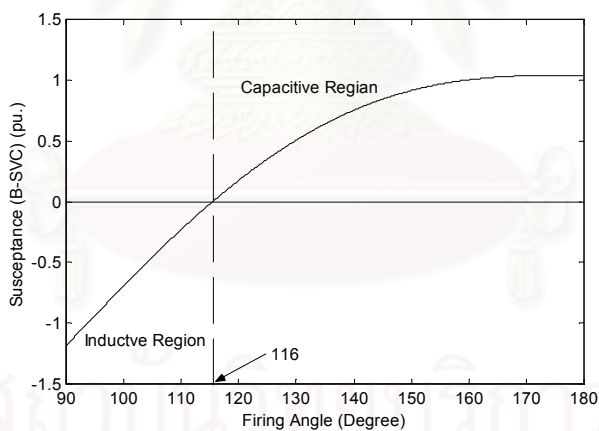
รีแอคแตนซ์สมมูลของ TCR (X_{Leq}) แสดงดังสมการที่ (2.8)

$$X_{Leq} = \frac{\pi X_L}{\sin 2\alpha + 2(\pi - \alpha)} \quad (2.8)$$

การปรับมุมจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ X_{Leq} เปลี่ยนและจะได้ชั้สเซฟแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC (B_{SVC}) แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$B_{SVC} = \frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \quad (2.9)$$

ค่าของ B_{SVC} จะเปลี่ยนตามค่ามุม α ซึ่งเป็นมุมจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ ถ้าให้จุดชนวนเกตมีค่าจาก 90 องศา ถึง 180 องศา กำหนดให้ X_C มีค่า 0.9 pu. และ X_L มีค่า 0.45 pu. ได้กราฟดังรูปที่ 2.16 ที่มุมประมาณ 116 องศาเป็นมุมที่แบ่งคุณสมบัติของ SVC นั่นคือถ้ามุมจุดชนวนเกตอยู่ระหว่าง 90-116 องศา เป็นคุณสมบัติของชั้สเซฟแตนซ์ชนิดตัวเหนี่ยวนำและที่มุมระหว่าง 116-180 องศา เป็นคุณสมบัติของชั้สเซฟแตนซ์ชนิดตัวเก็บประจุ มุมที่แบ่งคุณสมบัตินี้ก็จะขึ้นอยู่กับค่าของ X_C และ X_L



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงคุณสมบัติของ SVC

สมการกำลังไฟฟารีแอกตีฟของอุปกรณ์ SVC ที่จ่ายเข้าที่บัสแสดงดังสมการที่ (2.10)

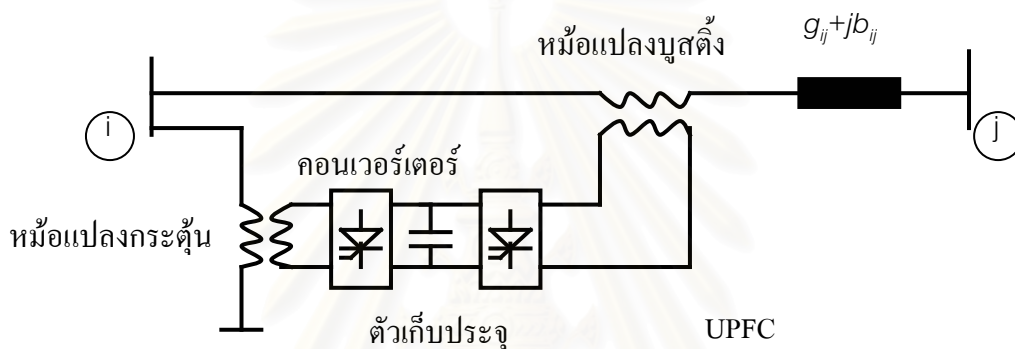
$$Q_{iSVC} = -V_i^2 B_{SVC} \quad (2.10)$$

โดยที่ Q_{iSVC} คือ กำลังไฟฟารีแอกตีฟของอุปกรณ์ SVC ที่ไหลเข้าสู่บัส i

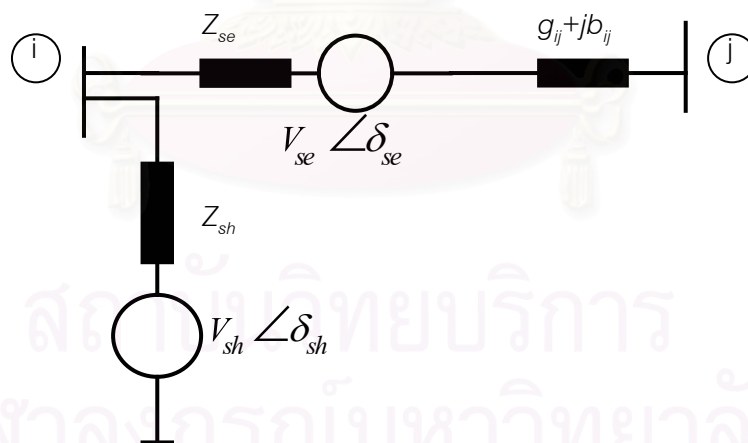
V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i

2.3.1.3 อุปกรณ์ Unified Power Flow Controlled (UPFC)[9]

UPFC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยสามารถควบคุมพารามิเตอร์พื้นฐานของการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า โครงสร้างของ UPFC ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจำนวน 2 ตัว ต่อแบบขนาน 1 ตัว และต่อแบบอนุกรม 1 ตัว หม้อแปลงกระตุ้น หม้อแปลงบูสต์ติง และตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 การควบคุมจะเป็นการควบคุมที่แรงดันและมุมของแรงดันในรูปแบบจำลอง และสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเขียนได้ดังสมการที่ (2.12)-(2.15)



รูปที่ 2.17 แผนภาพแบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC



รูปที่ 2.18 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC

โดยที่ V_{se} , δ_{se} คือ ขนาดและมุมของแรงดันของ UPFC ที่ต่ออนุกรมกับสายส่ง

V_{sh} , δ_{sh} คือ ขนาดและมุมของแรงดันของ UPFC ที่ต่อขนานเข้ากับบัส

Z_{sh} , Z_{se} คือ ค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานและแบบอนุกรมของ UPFC

สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าบนสายส่งที่ติดตั้ง UPFC แสดงดังสมการที่ (2.11) –(2.14)

$$\begin{aligned}
P_{ij} = & V_i^2 (g_{sh} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \\
& + V_i V_{se} (g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_{se}) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_{se})) \\
& - V_i V_{sh} (g_{sh} \cos(\delta_i - \delta_{sh}) + b_{sh} \sin(\delta_i - \delta_{sh}))
\end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned}
Q_{ij} = & -V_i^2 (b_{ij} + b_{sh}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \\
& + V_i V_{se} (g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_{se}) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_{se})) \\
& - V_i V_{sh} (g_{sh} \sin(\delta_i - \delta_{sh}) - b_{sh} \cos(\delta_i - \delta_{sh}))
\end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
P_{ji} = & V_j^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ji} + b_{ij} \sin \delta_{ji}) \\
& - V_j V_{se} (g_{ij} \cos(\delta_j - \delta_{se}) + b_{ij} \sin(\delta_j - \delta_{se}))
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}
Q_{ji} = & -V_j^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ji} - b_{ij} \cos \delta_{ji}) \\
& - V_j V_{se} (g_{ij} \sin(\delta_j - \delta_{se}) - b_{ij} \cos(\delta_j - \delta_{se}))
\end{aligned} \tag{2.14}$$

สมมุติว่าไม่มีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นในอุปกรณ์ UPFC และแรงดันกระแสตรงระหว่างคอนเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ดังนั้นอุปกรณ์ UPFC จะไม่มีการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายให้กับคอนเวอร์เตอร์แบบขนานต้องมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบไฟฟ้ากำลังได้จากคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม ดังสมการที่ (2.15)

$$P_{sh} + P_{se} = 0 \tag{2.15}$$

$$P_{sh} = -g_{sh} V_{sh}^2 - V_i V_{sh} (g_{sh} \cos(\delta_i - \delta_{sh}) - b_{sh} \sin(\delta_i - \delta_{sh}))$$

$$\begin{aligned}
P_{se} = & V_{se}^2 g_{ij} - V_i V_{se} (g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_{se}) - b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_{se})) \\
& + V_j V_{se} (g_{ij} \cos(\delta_j - \delta_{se}) - b_{ij} \sin(\delta_j - \delta_{se}))
\end{aligned}$$

$$g_{sh} + jb_{sh} = 1/Z_{sh} \quad , \quad g_{se} + jb_{se} = 1/Z_{se}$$

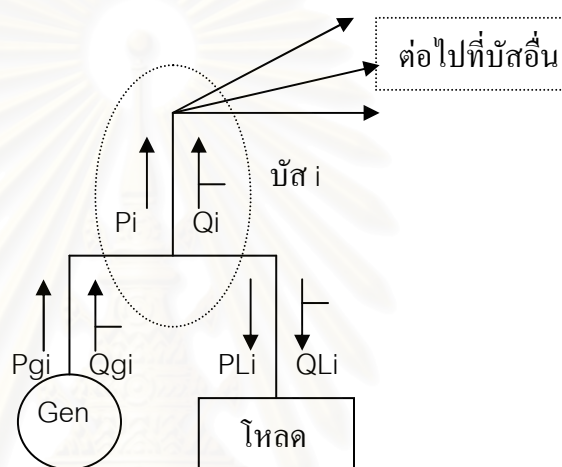
โดยที่ P_{sh} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายให้กับคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

P_{se} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบไฟฟ้ากำลังได้รับจากคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

2.4 สมการกำลังไฟฟ้า

2.4.1 สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่บัสจะมีค่าเท่ากับศูนย์หรืออาจกล่าวได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับบัสจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส แสดงดังรูปที่ 2.19 เขียนเป็น สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้าโดยแยกเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ดังนี้



รูปที่ 2.19 การไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส

$$P_i = P_{gi} - P_{Li} \quad (2.16)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{Li} \quad (2.17)$$

$$P_i + jQ_i = V_i \times I_i^* \quad (2.18)$$

โดยที่ P_i, Q_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลจากบัส i ไปที่บัสอื่น ๆ

P_{gi}, Q_{gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

P_{Li}, Q_{Li} คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส i

V_i คือ แรงดันที่บัส i

I_i คือ กระแสที่ไหลจากบัส i ไปที่บัสอื่น ๆ

2.4.2 สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง[10]

สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้าเป็นสมการที่สร้างขึ้นจากการนำเอาสมการ โหนดจำนวน n สมการตามขนาดของระบบที่มี n บัส ไม่รวมบัสอ้างอิง มาเขียนในรูปแบบของ

เมตริกซ์ ดังนั้นสมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงได้ในรูปของบัสแอดมิแตนซ์ จะมีลักษณะดังสมการที่ (2.19)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

หรือเขียนใหม่ให้กระทัดรัดได้ดังสมการที่ (2.20)

$$[I_{BUS}] = [Y_{BUS}][V_{BUS}] \quad (2.20)$$

โดยที่ I_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส

V_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกลุ่มแรงดันบัส

Y_{BUS} คือ บัสแอดมิแตนซ์

กระแสที่ไหลออกจากบัส i ไปยังบัสอื่นๆ เขียนได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{k=1}^n V_k Y_{ik}$$

แทนค่า I_i ในสมการกำลังไฟฟ้า

$$P_i + jQ_i = V_i \times \left(\sum_{k=1}^n V_k Y_{ik} \right)^*$$

กำหนดให้ $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}, V_i = V_i \angle \delta_i, V_k = V_k \angle \delta_k$

$$P_i + jQ_i = V_i \times \sum_{k=1}^n V_k [\cos(\delta_i - \delta_k) + j \sin(\delta_i - \delta_k)](G_{ik} - jB_{ik})$$

$$P_i + jQ_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] +$$

$$jV_i \sum_{k=1}^n V_k [G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)]$$

แบ่งส่วนที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกติฟได้ดังนี้

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] \quad (2.21)$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k [G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (2.22)$$

กรณีที่พิจารณาเทปหม้อแปลงไฟฟ้าเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_i V_k T_{ik} [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] + V_i^2 (1 - T_{ik}^2) G_{ik} \quad (2.23)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_i V_k T_{ik} [G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] - V_i^2 (1 - T_{ik}^2) B_{ik} \quad (2.24)$$

เมื่อ T_{ij} เป็นอัตราส่วนเทปหม้อแปลง ถ้าระหว่างบัสไม่มีหม้อแปลงที่มีเทปกำหนดให้ $T_{ik} = 1$

2.4.3 สมการขีดจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง

เนื่องจากขีดจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งบอกเป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ ที่มีขนาด $S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$ ที่สามารถให้ไหลผ่านสายระหว่างบัส i ไปที่ บัส j โดยไม่เกิดปัญหา ดังนั้นเพื่อให้สมการง่ายต่อการคำนวณจึงพิจารณาเทียบกับขีดจำกัดยกกำลังสอง สมการพื้นฐานของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งยกกำลังสองแสดงดังสมการที่ (2.25)

$$S_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (2.25)$$

โดยสมการจะพิจารณาเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์เพิ่มเติมอื่นติดตั้งที่สายส่ง กรณีที่มีหม้อแปลงติดตั้ง กรณีที่มีการติดตั้ง TCSC และกรณีที่ติดตั้ง UPFC

2.4.3.1 สายที่ไม่มีอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม

กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์อื่นติดตั้งระหว่างสายส่งสามารถนำสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามายกกำลังสองโดยแบ่งส่วนที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แล้วนำมาบวกตามสมการที่ (2.25) สมการกำลังสองของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง แสดงดังสมการที่ (2.26)

$$\begin{aligned}
 P_{ij} + jQ_{ij} &= \left\langle g_{ij} \times V_i^2 - V_i V_j \times \left[g_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \right\rangle \\
 &\quad + j \left\langle -b_{ij} \times V_i^2 - V_i V_j \times \left[g_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \right\rangle \\
 \delta_{ij} &= \delta_i - \delta_j \\
 P_{ij}^2 &= g_{ij}^2 \times V_i^4 - 2 \times g_{ij} \times V_i^2 \times V_i V_j \times \left[g_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) + b_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) \right] \\
 &\quad + V_i^2 V_j^2 \times \left[g_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) + b_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) \right]^2 \\
 Q_{ij}^2 &= (-b_{ij})^2 \times V_i^4 - 2 \times (-b_{ij}) \times V_i^2 \times V_i V_j \times \left[g_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) - b_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) \right] \\
 &\quad + V_i^2 V_j^2 \times \left[g_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) + b_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) \right]^2 \\
 P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 &= (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) \times V_i^4 \\
 &\quad + 2 \times V_i^3 \times V_j \times \left[-g_{ij}^2 \times \cos(\delta_{ij}) - g_{ij} b_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) + b_{ij} g_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) - b_{ij}^2 \times \cos(\delta_{ij}) \right] \\
 &\quad + V_i^2 V_j^2 \times \left[\begin{aligned} &g_{ij}^2 \times \cos^2(\delta_{ij}) + g_{ij} b_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) \times \sin(\delta_{ij}) + b_{ij}^2 \times \sin^2(\delta_{ij}) \\ &+ g_{ij}^2 \times \sin^2(\delta_{ij}) - g_{ij} b_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) \times \sin(\delta_{ij}) + b_{ij}^2 \times \cos^2(\delta_{ij}) \end{aligned} \right] \\
 S_{ij}^2 &= \left\langle V_i^4 - 2 \times V_i^3 \times V_j \times \cos(\delta_{ij}) + V_i^2 V_j^2 \right\rangle \times \left\langle g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \right\rangle \quad (2.26)
 \end{aligned}$$

2.4.3.2 สายที่ติดตั้งหม้อแปลง

เมื่อมีหม้อแปลงติดตั้งระหว่างสายส่งจะต้องนำค่าที่ปห้อมแปลงมาประกอบกับสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วย แล้วนำสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสองโดยแบ่งส่วนที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ตามสมการที่ (2.25) สมการกำลังสองของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งที่มีหม้อแปลงติดตั้ง แสดงดังสมการที่ (2.27)

$$\begin{aligned}
P_{ij} + jQ_{ij} &= \left\langle t^2 \times g_{ij} \times V_i^2 - t \times V_i V_j \times \left[g_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \right\rangle \\
&\quad + j \left\langle -t^2 \times b_{ij} \times V_i^2 - t \times V_i V_j \times \left[g_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \right\rangle \\
S_{ij}^2 &= \left\langle t^4 V_i^4 - 2 \times t^3 \times V_i^3 \times V_j \times \cos(\delta_{ij}) + t^2 V_i^2 V_j^2 \right\rangle \times \left\langle g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \right\rangle
\end{aligned} \tag{2.27}$$

2.4.3.3 สายที่ติดตั้ง TCSC

สายที่ติดตั้ง TCSC จะทำให้เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งดังนั้นการคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ตามสมการที่ (2.28) แล้วจึงนำสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามายกกำลังสองโดยแบ่งส่วนที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกตีฟบวกกันตามสมการที่ (2.25) สมการกำลังสองของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งที่ติดตั้ง TCSC แสดงดังสมการที่ (2.29)

$$z_n = g_n + jb_n \tag{2.28}$$

$$\begin{aligned}
\text{เมื่อ } g_n &= \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} + X_{TCSC})^2} \\
b_n &= -\frac{(x_{ij} + X_{TCSC})}{r_{ij}^2 + (x_{ij} + X_{TCSC})^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{ij} + jQ_{ij} &= \left\langle g_n \times V_i^2 - V_i V_j \times \left[g_n \times \cos(\delta_i - \delta_j) + b_n \times \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \right\rangle \\
&\quad + j \left\langle -b_n \times V_i^2 - V_i V_j \times \left[g_n \times \sin(\delta_i - \delta_j) - b_n \times \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \right\rangle \\
P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 &= \left\langle V_i^4 - 2 \times V_i^3 \times V_j \times \cos(\delta_{ij}) + V_i^2 V_j^2 \right\rangle \times \left\langle g_n^2 + b_n^2 \right\rangle \\
S_{ij}^2 &= \left\langle V_i^4 - 2 \times V_i^3 \times V_j \times \cos(\delta_{ij}) + V_i^2 V_j^2 \right\rangle \times \left\langle \frac{r_{ij}^2 + (x_{ij} + X_{TCSC})^2}{(r_{ij}^2 + (x_{ij} + X_{TCSC})^2)^2} \right\rangle
\end{aligned} \tag{2.29}$$

2.4.3.4 สายที่ติดตั้ง UPFC

สายที่ติดตั้ง UPFC จะมีตัวแปรของแรงดันและมุมของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อแบบอนุกรมของ UPFC ดังนั้นการคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าต้องพิจารณาตัวแปรทั้ง 2 ตัวของอุปกรณ์ UPFC เข้าไปด้วย แล้วจึงนำสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามายกกำลังสองโดยแบ่งส่วนที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ แล้วนำมาบวกกันตามสมการที่ (2.25) สมการกำลังสองของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งที่ติดตั้ง UPFC แสดงดังสมการที่ (2.30)

$$\begin{aligned}
 P_{ij} + jQ_{ij} &= \left\langle \begin{aligned} &g_{ij} \times V_i^2 - V_i V_j \times [g_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ &- V_i V_{se} \times [g_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_{se}) + b_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_{se})] \end{aligned} \right\rangle \\
 &+ j \left\langle \begin{aligned} &-b_{ij} \times V_i^2 - V_i V_j \times [g_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_j)] \\ &- V_i V_{se} \times [g_{ij} \times \sin(\delta_i - \delta_{se}) - b_{ij} \times \cos(\delta_i - \delta_{se})] \end{aligned} \right\rangle \\
 \delta_{ise} &= \delta_i - \delta_{se} \\
 P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 &= \left\langle g_{ij} \times V_i^2 - V_i V_j [g_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) + b_{ij} \times \sin(\delta_{ij})] \right\rangle^2 \\
 &+ \left\langle -b_{ij} \times V_i^2 - V_i V_j [g_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) - b_{ij} \times \cos(\delta_{ij})] \right\rangle^2 \\
 &- 2 \left\langle (g_{ij} \times V_i^2) \times V_i V_{se} [g_{ij} \times \cos(\delta_{ise}) + b_{ij} \times \sin(\delta_{ise})] \right\rangle \\
 &- 2 \left\langle (-b_{ij} \times V_i^2) \times V_i V_{se} [g_{ij} \times \sin(\delta_{ise}) - b_{ij} \times \cos(\delta_{ise})] \right\rangle \\
 &+ 2 \left\langle V_i V_j [g_{ij} \times \cos(\delta_{ij}) + b_{ij} \times \sin(\delta_{ij})] \times V_i V_{se} [g_{ij} \times \cos(\delta_{ise}) + b_{ij} \times \sin(\delta_{ise})] \right\rangle \\
 &+ 2 \left\langle V_i V_j [g_{ij} \times \sin(\delta_{ij}) - b_{ij} \times \cos(\delta_{ij})] \times V_i V_{se} [g_{ij} \times \sin(\delta_{ise}) - b_{ij} \times \cos(\delta_{ise})] \right\rangle \\
 &+ \left\langle V_i V_{se} \times [g_{ij} \times \cos(\delta_{ise}) + b_{ij} \times \sin(\delta_{ise})] \right\rangle^2 \\
 &+ \left\langle V_i V_{se} \times [g_{ij} \times \sin(\delta_{ise}) - b_{ij} \times \cos(\delta_{ise})] \right\rangle^2 \\
 S_{ij}^2 &= \left\langle \begin{aligned} &V_i^4 - 2 \times V_i^3 V_j \cos(\delta_{ij}) + V_i^2 V_j^2 \\ &- 2 \times V_i^2 V_{se} \cos(\delta_{ise}) + 2 \times V_i^2 V_j V_{se} \cos \delta_{sej} + V_i^2 V_{se}^2 \end{aligned} \right\rangle \times \left\langle g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \right\rangle \quad (2.30)
 \end{aligned}$$

2.5 สมการกำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าเกิดจากในระบบสายส่งหรือหม้อแปลงมีค่าความต้านทาน และเมื่อมีกระแสไหลผ่านจึงทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง โดยกำลังสูญเสียในแต่ละสายส่งก็จะมีค่า $I_L^2 \times r_L$ หรืออาจเขียนสมการกำลังสูญเสียจากการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงบนสายส่ง นั่นคือผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปบัส j กับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส j ไปบัส i ก็จะเป็นค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งนั้นๆ และกำลังสูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับการรวมของกำลังสูญเสียในแต่ละสายส่ง

$$P_L = \sum_{n=1}^{N_L} (P_{ij} + P_{ji}) \quad (2.31)$$

$$P_{ij} = -T_{ij} (G_{ij} [V_i^2 - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] + B_{ij} [V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j)])$$

$$P_{ji} = -T_{ij} (G_{ij} [V_j^2 - V_i V_j \cos(\delta_j - \delta_i)] + B_{ij} [V_i V_j \sin(\delta_j - \delta_i)])$$

$$P_{Ln} = (P_{ij} + P_{ji}) = -T_{ij} G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

โดยที่ P_L คือ กำลังสูญเสียทั้งหมด

P_{ij} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส i ไปบัส j

G_{ij} คือ เป็นส่วนจริงของ Y_{ij} ของ Y_{bus} ($Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$)

N_L คือ จำนวนสายส่ง

เพื่อให้สมการกำลังสูญเสียสัมพันธ์กับสมการกำลังไฟฟ้า อีกรูปแบบของกำลังสูญเสียหาได้จากหลักการที่ว่าผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆจะต้องเท่ากับศูนย์กรณีที่ไม่มีกำลังสูญเสีย แต่ถ้ามีผลต่างก็เป็นค่ากำลังสูญเสีย ซึ่งสมการที่ได้ก็จะสัมพันธ์กับสมการกำลังไฟฟ้าที่ต้องคำนวณอยู่แล้วทำให้ประหยัดเวลาในการคำนวณ สมการแสดงได้ดังนี้

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_B} P_i \quad (2.32)$$

$$\text{โดยที่ } P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_i V_k T_{ik} [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] + V_i^2 (1 - T_{ik}^2) G_{ik}$$

เมื่อ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i

N_B คือ จำนวนบัสในระบบไฟฟ้า

2.6 สมการเพาเวอร์โพล์

การศึกษาเพาเวอร์โพล์เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าขนาดแรงดัน และมุมเฟสที่บัสต่างๆ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปคำนวณหาค่า กระแส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟของระบบไฟฟ้าในสภาวะทำงานปกติ เพื่อใช้ในการศึกษาถึงการทำงานในอนาคตรของระบบ พร้อมทั้งเป็นข้อมูลที่ใช้วางแผนปรับปรุงระบบเช่น การเพิ่มโหลด การเพิ่มแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือการก่อสร้างสายส่งใหม่ ก่อนที่จะมีการดำเนินการติดตั้งจริง ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเพาเวอร์โพล์ก็จะมีพารามิเตอร์ของสายส่ง หม้อแปลง ขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดโหลด โดยที่บัสของระบบแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. บัสอ้างอิง(Reference bus หรือ Slack bus) เป็นบัสที่ถูกเลือกไว้เป็นตัวจ่ายกำลังงานไฟฟ้า P และ Q ให้กับระบบที่เหลือจากการจ่ายจากเครื่องกำเนิดที่บัสอื่นๆ กำลังไฟฟ้า P และ Q ที่บัสนี้จะทราบได้ก็ต่อเมื่อสิ้นสุดการคำนวณ ค่าที่ทราบคือขนาดแรงดัน V และมุมเฟส δ

2. บัสควบคุมแรงดัน(Voltage control bus) เป็นบัสที่มีการควบคุมขนาดแรงดันค่าที่จะทราบคือขนาดของแรงดันบัสที่ต้องการควบคุม และกำลังไฟฟ้า P (บางครั้งเรียกว่า PV bus) ซึ่งการควบคุมจะใช้การเปลี่ยนค่าของกำลังไฟฟ้า Q โดยที่ Q ต้องมีค่าอยู่ในขีดจำกัด ถ้าไม่อยู่ในขีดจำกัดก็จะถูกเปลี่ยนเป็นโหลดบัสโดยปรับค่า Q ให้เป็นค่าต่ำสุดหรือสูงสุดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟที่บัสนั้นๆ

3. โหลดบัส(Load bus) บัสที่จ่ายโหลดให้ระบบ ค่าที่ทราบคือกำลังไฟฟ้า P และ Q (บางครั้งเรียก PQ bus)

วิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาเพาเวอร์โพล์มีด้วยกันหลายวิธี ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ นิวตัน-แรฟสัน ซึ่งใช้หลักการหาความแตกต่างของ P และ Q ที่คำนวณจากค่าแรงดันที่สมมุติขึ้นเทียบกับค่า P และ Q ที่เป็นจริง ถ้าความแตกต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าน้อยก็แสดงว่าค่าแรงดันเข้าใกล้ค่าที่ควรจะเป็นมากขึ้น โดยนำค่า $\Delta P, \Delta Q$ ไปคำนวณหาค่าแรงดันในรอบต่อไป ซึ่งจะใช้การหาเมตริกซ์ของอนุพันธ์ย่อยซึ่งเรียกว่าเมตริกซ์จาโคเบียน(Jacobian matrix) เข้าช่วยเพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ขบวนการแก้ปัญหาการเพาเวอร์โพล์มีดังนี้

$$\text{กำหนดให้ } V_i = V_i \angle \delta_i, \quad V_k = V_k \angle \delta_k, \quad Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

ได้สมการกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ดังสมการที่ (2.33) – (2.34)

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NB} V_i V_j T_{ij} [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] + V_i^2 (1 - T_{ij}^2) G_{ij} \quad (2.33)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NB} V_i V_j T_{ij} [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] - V_i^2 (1 - T_{ij}^2) B_{ij} \quad (2.34)$$

การหาค่าปรับแต่งของมุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละรอบการคำนวณ แสดงได้ดังสมการที่ (2.35)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

ความต่างของกำลังไฟฟ้าที่บัสหาได้จากกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสลบด้วยกำลังไฟฟ้าที่คำนวณจากค่าแรงดันและมุมที่คำนวณได้ในแต่ละรอบแสดงดังสมการที่ (2.36)-(2.37)

$$\Delta P_i = P_{i_sch} - P_{i_calc} \quad (2.36)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i_sch} - Q_{i_calc} \quad (2.37)$$

โดยที่เมตริกซ์ J หาได้จากสมการที่ (2.38)-(2.45)

สมการของ J1

$$\text{แนวทแยง : } \frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -V_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{NB} V_j T_{kj} (G_{kj} \sin(\delta_k - \delta_j) - B_{kj} \cos(\delta_k - \delta_j)) \quad (2.38)$$

$$\text{นอกแนวทแยง : } \frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = V_k V_i T_{ki} (G_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i) - B_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i)) \quad (2.39)$$

สมการของ J2

$$\text{แนวทแยง : } \frac{\partial P_k}{\partial V_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{NB} V_j T_{kj} (G_{kj} \cos(\delta_k - \delta_j) + B_{kj} \sin(\delta_k - \delta_j)) \quad (2.40)$$

$$\text{นอกแนวทแยง : } \frac{\partial P_k}{\partial V_i} = V_k T_{ki} (G_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i) + B_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i)) \quad (2.41)$$

สมการของ J3

$$\text{แนวทแยง : } \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = V_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{NB} V_j T_{kj} (G_{kj} \cos(\delta_k - \delta_j) + B_{kj} \sin(\delta_k - \delta_j)) \quad (2.42)$$

$$\text{นอกแนวทแยง : } \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -V_k V_i T_{ki} (G_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i) + B_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i)) \quad (2.43)$$

สมการของ J4

$$\text{แนวทแยง } \frac{\partial Q_k}{\partial V_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{NB} V_j T_{kj} (G_{kj} \sin(\delta_k - \delta_j) - B_{kj} \cos(\delta_k - \delta_j)) \quad (2.44)$$

$$\text{นอกแนวทแยง : } \frac{\partial Q_k}{\partial V_i} = V_k T_{ki} (G_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i) - B_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i)) \quad (2.45)$$

คำนวณหาค่า $\Delta\delta, \Delta V$ ตามสมการที่ 2.36

ขั้นตอนการแก้ปัญหาเพาเวอร์โพลว์โดยวิธีการนิวตัน-แร็พสันมีดังนี้

1. สร้างเมตริกซ์ Ybus
2. กำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆของระบบ และกำหนดดัชนีคำนวณจำนวนรอบ k=0
3. คำนวณความต่างของกำลังไฟฟ้าตามสมการที่(2.36)-(2.37) กรณีที่เป็นบัสควบคุมต้องตรวจสอบว่าค่ากำลังรีแอกทีฟเกินพิกัดหรือไม่ ถ้าเกินต้องปรับให้เป็นโหนดบัสและปรับค่า Q ด้วย
4. ตรวจสอบการลู่เข้าโดยดูที่ค่าความต่างของกำลังไฟฟ้าถ้าลู่เข้าก็หยุดถ้าไม่ลู่เข้าให้

คำนวณในขั้นตอนต่อไป

5. สร้างเมตริกซ์จาโคเบียนตามสมการที่ (2.38)-(2.45)
6. คำนวณหาค่าปรับแต่งตามสมการที่ (2.35)
7. ปรับตั้งค่าขนาดและมุมของแรงดัน
8. เพิ่มดัชนีคำนวณจำนวนรอบ k=k+1 กลับไปทำขั้นตอนที่ 3

บทที่ 3

การวิจัยองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกทีฟ

ระบบไฟฟ้ากำลังและแบบจำลองต่างๆ ที่กล่าวมาในบทที่ 2 คำนวณค่าปรับตั้งตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการจะต้องมีกระบวนการในการหาค่าปรับตั้งให้ได้ค่าที่เหมาะสมและเป็นจริงสำหรับระบบไฟฟ้าโดยจะกล่าวถึงพื้นฐานออปติมอลเพาเวอร์โฟลว์และอัลกอริทึมที่จะแก้ปัญหา ส่วนแนวทางที่นำมาพิจารณาเพื่อดูผลกระทบต่อ การลดลงของกำลังสูญเสียอันได้แก่ เสถียรภาพแรงดัน ค่าเผื่อของอุปกรณ์ควบคุม การเพิ่มอุปกรณ์เพิ่มเติมและหาจุดติดตั้งที่เหมาะสม

3.1 สมการออปติมอลเพาเวอร์โฟลว์ (Optimal Power Flow : OPF)[11]

ปัญหาการทำออปติมอลเพาเวอร์โฟลว์ ได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ต้นปี 1960 และได้นำมาใช้อย่างแพร่หลายในการทำงานและการวางแผนในระบบไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของสมการไม่เชิงเส้น การหาค่าปรับตั้งของตัวแปรต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของระบบด้วย ในการคำนวณออปติมอลเพาเวอร์โฟลว์จะถูกจัดให้อยู่ในรูปปัญหาแบบไม่เชิงเส้นดังนี้

$$\min f(x)$$

subjective to

$$g(x) = 0$$

$$h^{\min} < h(x) < h^{\max}$$

เมื่อ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุด เช่น กำลังสูญเสีย หรือ ราคาการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $g(x)$ เป็นสมการแบบเท่ากับโดยทั่วไปเป็นสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า และ $h(x)$ เป็นสมการที่เป็นเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับในระบบไฟฟ้าเช่น ค่าขีดจำกัดของสายส่ง ค่าพิคัดของตัวแปรควบคุมต่างๆ โดยมีค่าต่ำสุดเป็น h^{\min} และค่าสูงสุดเป็น h^{\max} โดยวิธีการที่จะมาแก้ปัญหาก็มีหลากหลายวิธีเพื่อให้ได้มาซึ่งวัตถุประสงค์ที่ต้องการ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปแบบการลดกำลังสูญเสีย โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.1) และมีเงื่อนไขเป็นสมการความสมดุลของระบบไฟฟ้า ขีดจำกัดการไหลของสายส่ง และขีดจำกัดของอุปกรณ์ปรับตั้งต่างๆ ตามสมการที่ (3.2)-(3.5)

$$\min f(x) = \sum_k^{N_L} (P_{ij}^k + P_{ji}^k) \quad (3.1)$$

Subjective to

$$P_{Gi} + P_{si} - P_{Li} - P_i = 0 \quad (3.2)$$

$$Q_{Gi} + Q_{si} - Q_{Li} - Q_i = 0 \quad (3.3)$$

$$S_k^{\min} \leq S_k \leq S_k^{\max} \quad (3.4)$$

$$X^{\min} \leq X \leq X^{\max} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$X = [V, T, Q_g, B_{Cap}, X_{TCSC}, B_{SCV}, V_{sh}, \delta_{sh}, V_{se}, \delta_{se}]$$

โดยที่

P_{ij}^k คือ กำลังไฟฟ้าที่สายส่ง k ไหลจากบัส i ไปบัส j

P_{ji}^k คือ กำลังไฟฟ้าที่สายส่ง k ไหลจากบัส j ไปบัส i

P_G, Q_G คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกตีฟของเครื่องกำเนิด

P_S, Q_S คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกตีฟของอุปกรณ์เพิ่มเติม

P_L, Q_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกตีฟของโหลด

S_k คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง k

V คือ แรงดันที่บัส

T คือ แท็ปหม้อแปลง

B_{Cap} คือ ค่าชั้สเซพแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

X_{TCSC} คือ รีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC

B_{SVC} คือ ชั้สเซพแดนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC

V_{se}, δ_{se} คือ ขนาดและมุมของแรงดันของ UPFC ที่ต่ออนุกรมกับสายส่ง

V_{sh}, δ_{sh} คือ ขนาดและมุมของแรงดันของ UPFC ที่ต่อขนานเข้ากับบัส

X คือ ตัวแปรที่ใช้ในการปรับตั้ง

X_{min} คือ ขีดจำกัดล่างของตัวแปรที่ใช้ในการปรับตั้ง

X_{max} คือ ขีดจำกัดบนของตัวแปรที่ใช้ในการปรับตั้ง

N_L คือ จำนวนสายส่ง

3.2 หลักวิธีอินทีเรียพอยนท (Interior Point) [12,13,14]

การหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสม โดยที่มีสมการเป็นแบบไม่เชิงเส้นสามารถใช้วิธีการอินทีเรียพอยนท ในการแก้ปัญหาซึ่งจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ วิธีการเพิ่มตัวแปรพิเศษ(Barrier Method) เข้าไปสำหรับสมการที่เป็นแบบไม่เท่ากับ วิธีการลากรองสำหรับสมการแบบเท่ากับ และการหาผลเฉลยของสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ใช้วิธีการเพิ่มตัวแปรพิเศษ เข้าไปที่เงื่อนไขแบบไม่เท่ากับเพื่อทำให้เป็นสมการแบบเท่ากับ และจัดรูปสมการได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{สมการวัตถุประสงค์} \quad \min \quad f(x) - \mu \sum_{i=1}^N \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^N \ln(su_i) \quad (3.6)$$

เงื่อนไข

subjective to

$$g(x) = 0 \quad (3.7)$$

$$h(x) - sl - h^{\min} = 0 \quad (3.8)$$

$$h(x) + su - h^{\max} = 0 \quad (3.9)$$

เมื่อ $\mu > 0$; $sl, su \geq 0$

จากสมการที่ (3.6)-(3.7) สร้างเป็นรูปแบบลากรอง(Lagrangian Form) ได้สมการเป็น

$$L = f(x) - \mu \sum \ln(sl) - \mu \sum \ln(su) - \lambda^T g(x) - \pi l^T (h(x) - sl - h^{\min}) - \pi u^T (h(x) + su - h^{\max}) \quad (3.10)$$

เมื่อ $\pi l \geq 0, \pi u \leq 0$

โดยที่ $\lambda, \pi l, \pi u$ คือ ตัวคูณลากรองของสมการที่ (3.5), (3.6), (3.7) ตามลำดับ

เงื่อนไขจำเป็นลำดับแรกที่จะบอกได้ว่าผลตอบเป็นค่าที่เหมาะสมต้องเป็นไปตามสมการของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) โดยเขียนสมการได้ดังนี้

$$\nabla L_x = \nabla f(x) - \nabla g(x)^T \lambda - \nabla h(x)^T (\pi l + \pi u) = 0 \quad (3.11)$$

$$\nabla L_\lambda = g(x) = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla L_{\pi l} = h(x) - sl - h^{\min} = 0 \quad (3.13)$$

$$\nabla L_{\pi u} = h(x) + su - h^{\max} = 0 \quad (3.14)$$

$$\nabla L_{sl} = Sl \times \Pi l e - \mu e = 0 \quad (3.15)$$

$$\nabla L_{su} = Su \times \Pi u e + \mu e = 0 \quad (3.16)$$

$$Sl = \text{diag}(sl), Su = \text{diag}(su)$$

$$\Pi l = \text{diag}(\pi l), \Pi u = \text{diag}(\pi u)$$

เมื่อ

สมการนิวตันสำหรับฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของอินทิเรียพอยนต์ เขียนในรูปแบบที่กะทัดรัดได้ดังสมการที่ (3.17)

$$\begin{bmatrix} H & -\nabla g(x) \\ \nabla g(x)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ -g(x) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$H = H_L - H_s$$

$$H_L = \nabla^2 f(x) - \lambda \nabla^2 g(x) - (\Delta \pi l + \Delta \pi u) \nabla^2 h(x)$$

$$H_s = \nabla h(x) \cdot S \cdot \nabla h(x)^T$$

$$b = \nabla h(x) [S_u^{-1} (\pi_u \nabla L_{\pi u} - \nabla L_{su}) - S_l^{-1} (\pi_l \nabla L_{\pi l} + \nabla L_{sl})] - \nabla L_x$$

$$\Delta \pi_l = -S_l^{-1} \Pi_l (\nabla h(x)^T \Delta x) - S_l^{-1} (\nabla L_{\pi l} + \nabla L_{sl})$$

$$\Delta \pi_u = S_u^{-1} \Pi_u (\nabla h(x)^T \Delta x) + S_u^{-1} (\nabla L_{\pi u} - \nabla L_{su})$$

$$\Delta sl = \nabla h(x)^T \Delta x + \nabla L_{\pi l}$$

$$\Delta su = -(\nabla h(x)^T \Delta x + \nabla L_{\pi u})$$

โดยที่

$$\nabla f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x^1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(x)}{\partial x^j} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(x)}{\partial x^n} \end{bmatrix}$$

$$\nabla^2 f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial (x^1)^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^j \partial x^1} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^n \partial x^1} \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^1 \partial x^j} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial (x^j)^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^n \partial x^j} \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^1 \partial x^n} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^j \partial x^n} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial (x^n)^2} \end{bmatrix}$$

ใช้วิธีการนิวตันหาผลเฉลยของสมการที่ (3.17) จะได้ค่า $\Delta x, \Delta \pi l, \Delta \pi u, \Delta \lambda, \Delta sl, \Delta su$ และวิธีการปรับค่าในลำดับถัดไปทำได้โดยบวกค่า $\Delta x, \Delta \pi l, \Delta \pi u, \Delta \lambda, \Delta sl, \Delta su$ เข้าไปที่ตัวแปรต่างๆ

$$sl = sl + \sigma \alpha_p \Delta sl$$

$$su = su + \sigma \alpha_p \Delta su$$

$$x = x + \sigma \alpha_p \Delta x$$

$$\lambda = \lambda + \sigma \alpha_d \Delta \lambda$$

$$\pi l = \pi l + \sigma \alpha_d \Delta \pi l$$

$$\pi u = \pi u + \sigma \alpha_d \Delta \pi u$$

เมื่อ $\sigma = 0.995 - 0.99995$ [15] โดยที่ σ เป็นค่าที่ป้องกันระยะก้าวของตัวแปรออกนอกขอบเขต ทำให้ผลตอบไม่ออกนอกขอบเขต ส่วนค่า α_p, α_d เป็นระยะก้าวของตัวแปรที่เหมาะสมโดยหาได้จากสมการ(3.18) - (3.19)

$$\alpha_p = \min \left\{ \min \left(\frac{sl}{-\Delta sl}, \min \left(\frac{su}{-\Delta su}, 1 \right) \right) \right\} \quad (3.18)$$

$$\alpha_d = \min \left\{ \min \left(\frac{-\pi l}{\Delta \pi l}, \min \left(\frac{\pi u}{-\Delta \pi u}, 1 \right) \right) \right\} \quad (3.19)$$

ผลตอบจะเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อ $su^T \pi u - sl^T \pi l = 0$ ซึ่งเรียกว่า Complementary gap(Cgap) ดังนั้นจะต้องคำนวณค่า Cgap เพื่อหยุดการคำนวณ

$$Cgap = su^T \pi u - sl^T \pi l \leq \varepsilon \quad (3.20)$$

โดยที่ ε คือค่าความต่างที่ยอมรับได้

การปรับลดของค่าตัวแปร barrier มีความสัมพันธ์กับค่า Cgap แสดงดังสมการที่ (3.21)

$$\mu = \frac{\beta \times Cgap}{2 \times n} \quad (3.21)$$

โดยที่ $\beta = 0.01 - 0.2$ [15]

n เป็นจำนวนเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ

ลำดับการคำนวณสำหรับสมการไม่เชิงเส้นของวิธีการอินทิเกรตพอยน์ทเขียนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นของระบบ และกำหนดดัชนีรอบการคำนวณ $k=0$

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบเงื่อนไขจำเป็นของ KKT ตามสมการที่ (3.11)-(3.16) และ

ตรวจสอบเงื่อนไขการเข้าสู่ค่าตอบของค่า Cgap ตามสมการ (3.20) ถ้าเข้าสู่ค่าตอบให้หยุดการคำนวณ และถ้าไม่เข้าเงื่อนไขก็ทำงานในลำดับถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการนิวตันตามสมการที่(3.17) และคำนวณหาค่าปรับแต่งของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 4 ปรับค่าตัวแปร โดยบวกเพิ่มจากค่าที่คำนวณได้จากการแก้สมการของนิวตัน

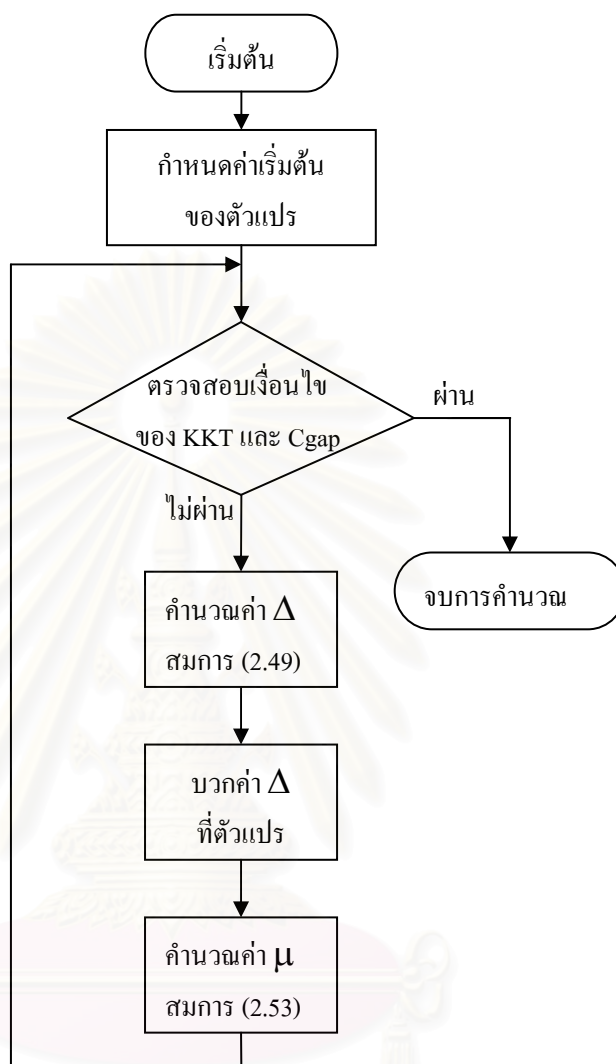
ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า Complementary gap ตามสมการที่(3.20)

ขั้นตอนที่ 6 หาค่า ตัวแปร barrier ตามสมการที่(3.21)

ขั้นตอนที่ 7 เพิ่มดัชนีรอบการคำนวณ $k=k+1$ ย้อนกลับไปที่ ขั้นตอนที่ 2

เขียนเป็นแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

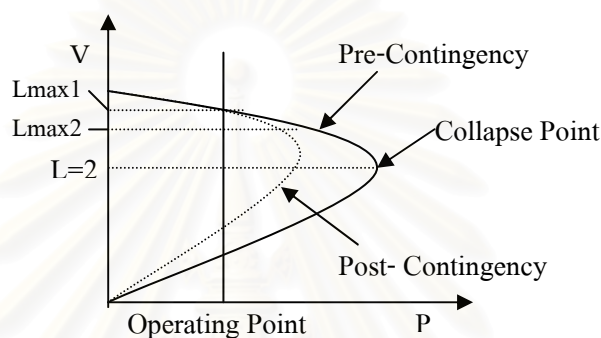


รูปที่ 3.1 แผนภาพการหาค่าผลเฉลยสมการไม่เชิงเส้นโดยวิธีอินที่เรียพอยนธ์

3.3 เสถียรภาพของแรงดัน

แรงดันที่ไม่เสถียรภาพ (Voltage Instability) อธิบายได้ว่าระบบไม่สามารถจ่ายกำลังรีแอกตีฟหรือระบบต้องการกำลังรีแอกตีฟมากเกินไป ทำให้แรงดันอยู่นอกการควบคุม [2] วิธีการที่จะช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดแรงดันที่ไม่เสถียรภาพคือจุดทำงานควรมีระยะห่างจากจุดที่หักเห (Collapse Point) ที่ต้องมีการเผื่อที่เพื่อป้องกันกรณีที่เกิดเหตุบกพร่อง ซึ่งเหตุดังกล่าวจะทำให้จุดหักเหลดลงจากระดับเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถ้าจุดทำงานอยู่ที่ $L_{\max 1}$ เมื่อเกิดเหตุบกพร่องระบบก็ยังทำงานได้ แต่ถ้าจุดทำงานอยู่ที่ $L_{\max 2}$ เมื่อเกิดเหตุบกพร่องในระบบก็จะทำให้แรงดันอยู่นอกเหนือการควบคุม การหาดัชนีก็มีหลายวิธีในที่นี้จะใช้ ดัชนี L เป็นตัวบ่งชี้ความมี

เสถียรภาพของระบบ[16] เพราะมีสมการที่สัมพันธ์กับสมการการแก้ปัญหาการลดกำลังสูญเสีย ซึ่งดัชนี L จะเป็นค่าที่ใช้เทียบระหว่างแรงดันที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันที่โหลดบัส ค่า L จะมีค่าระหว่าง 1 ถึง 2 โดยค่าที่เท่ากับ 1 จะหมายถึงกรณีที่ไม่มีโหลด และค่าที่เท่ากับ 2 หมายถึงค่าดัชนีที่ทำให้แรงดันที่บัสนั้นๆ ไม่มีเสถียรภาพ การปรับตั้งจะกำหนดค่า L_{max} มาค่าหนึ่งแล้วคำนวณให้ระบบมีค่าดัชนีที่น้อยกว่าค่าที่ตั้ง การตั้งค่า L_{max} ก็จะขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงานว่าจะปรับตั้งที่ค่าเท่าใดเพื่อให้เกิดความมั่นคง



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่บัส (PV Curve)

จากสมการความสัมพันธ์ของแรงดันกับโครงสร้างของระบบเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{LG} \\ Y_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

หาความสัมพันธ์ของแรงดันที่โหลดกับแรงดันที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL}^{-1} & -Y_{LL}^{-1}Y_{LG} \\ Y_{LL}^{-1}Y_{GL} & Y_{GG} - Y_{LL}^{-1}Y_{LG}Y_{GL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix}$$

ดัชนีบ่งชี้สำหรับโหลดบัสที่ k เขียนได้ดังสมการที่ (3.23)

$$L_k = \left| \frac{\sum_{i=1}^{Ng} H_{Lki} V_{Gi}}{V_k} \right|$$

เมื่อ

$$H_L = -Y_{LL}^{-1}Y_{LG}$$

$$\text{หรือ} \quad L_k = \frac{1}{V_k} \sum_{i=1}^{Ng} V_i (G_{ki} \cos \delta_{ki} - B_{ki} \sin \delta_{ki}) \quad (3.23)$$

$$\text{เมื่อ} \quad H_L = G_{ki} + jB_{ki}$$

โดยที่ V_L, I_L คือ แรงดันและกระแสของโหลดบัส

V_G, I_G คือ แรงดันและกระแสของบัสที่ติดตั้งอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังรีแอกทีฟ

V_k คือ แรงดันบัสที่ต้องกำหนดค่าดัชนี L

L_k คือ ดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่บัส k

สมการที่ (3.23) จะถูกใส่เพิ่มเข้าไปที่สมการออฟติมอลเพาเวอร์โฟลส์ในส่วนที่เป็นสมการแบบไม่เท่ากับ แสดงดังสมการ(3.24)

$$L_{\min} \leq \frac{1}{V_k} \sum_{i=1}^{Ng} V_i (G_{ki} \cos \delta_{ki} - B_{ki} \sin \delta_{ki}) \leq L_{\max} \quad (3.24)$$

โดยที่ L_{\min} คือ ค่าต่ำสุดของดัชนี L ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1

L_{\max} คือ ค่าสูงสุดของดัชนี L ที่ต้องการ

3.4 การเพิ่มค่าเผื่อของอุปกรณ์ควบคุม

การเผื่อของค่าของอุปกรณ์ควบคุมก็เพื่อเหลือค่าที่จะปรับตั้งในกรณีที่เกิดปัญหาการบกพร่องในระบบ[2] โดยจะพิจารณา 3 ชนิด คือ ค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ค่าเผื่อของตัวเก็บประจุ และขั้นของแท็ปหม้อแปลงแบบปรับได้ตามโหลด โดยการเพิ่มสมการเข้าไปที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ สาเหตุที่ต้องใช้การเพิ่มสมการเข้าไปแทนที่จะใช้การเผื่อโดยลดขีดจำกัดของอุปกรณ์เพราะว่าการเพิ่มสมการจะทำให้ระบบใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในระบบให้ได้เหมาะสมกับความต้องการจริง

3.4.1 การเพิ่มค่าเผื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การรักษาระดับแรงดันให้ได้ค่าที่ต้องการเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลง ต้องปรับกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟที่มีอยู่ในระบบ ฉะนั้นในสภาวะปกติควรมีกำลังรีแอกทีฟเหลือกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัว เพราะการปรับกำลังรีแอกทีฟจะมีผลต่อแรงดันในพิกัดหนึ่งเท่านั้น เช่น เมื่อระบบมีเหตุบกพร่องหรือเปลี่ยนแปลงบางอย่างที่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนั้นควรมีค่ารีแอกทีฟที่จะช่วยในระดับหนึ่ง การเผื่อค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิด จะมีผล

ต่อกำลังสูญเสียที่จะลดลง แต่ระบบก็มีความปลอดภัยมากขึ้น สมการค่าเผื่อของกำลังรีแอกตีฟถูกเพิ่มเข้าไปที่สมการกำลังสูญเสียที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเพิ่มในสมการแบบไม่เท่ากับของเงื่อนไข OPF สมการที่จะเพิ่มเข้าไปเป็นไปตามสมการที่ (3.25)

$$RM_i = \left(\frac{(Qg_i - Qg_i^{\min}) - (Qg_i^{\max} - Qg_i)}{(Qg_i^{\max} - Qg_i^{\min})} \right)^2 \quad (3.25)$$

เพิ่มในสมการวัตถุประสงค์

$$\min P_L + \beta \sum_i^{N_G} RM_i$$

เพิ่มเป็นเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_G} RM_i \leq SRM^{\max}$$

โดยที่ RM_i คือค่าเผื่อกำลังรีแอกตีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ i

Qg_i^{\min}, Qg_i^{\max} คือค่ากำลังรีแอกตีฟต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

β คือตัวประกอบน้ำหนักค่าเผื่อกำลังรีแอกตีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

SRM^{\max} คือผลรวมสูงสุดของค่าเผื่อกำลังรีแอกตีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการที่ (3.25) ค่า RM ที่น้อยแสดงให้เห็นว่าค่า Qg ถูกใช้ใกล้ค่ากลางระหว่าง Qg^{\min} และ Qg^{\max} ทำให้มีค่าเหลือที่จะใช้ปรับตั้งเพื่อรักษาระดับแรงดันในกรณีเกิดเหตุบกพร่องในระบบ และตัวประกอบน้ำหนัก β ถูกคูณเข้าไปกับสมการเพื่อให้น้ำหนักความสำคัญของค่าเผื่อ เช่นที่ $\beta = 1$ แสดงถึงความต้องการที่จะให้ความสำคัญในการเผื่อค่ากำลังรีแอกตีฟมากที่สุด ในขณะที่ถ้าไม่ต้องการก็กำหนดให้ $\beta = 0$ นอกจากการกำหนดที่ค่า β อาจจะกำหนดที่ค่าผลรวมสูงสุดของค่าเผื่อกำลังรีแอกตีฟ SRM^{\max} ที่กำหนดในสมการแบบไม่เท่ากับ

3.4.2 การเพิ่มค่าเผื่อกำลังรีแอกตีฟจากตัวเก็บประจุหรือ SVC

อุปกรณ์ที่จะจ่ายหรือรับกำลังรีแอกตีฟนอกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว ก็ยังมีอุปกรณ์อื่นเช่น ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ หรือ SVC ถ้าต้องการเหลือค่ากำลังรีแอกตีฟไว้ใช้ในกรณีเกิดเหตุบกพร่องในระบบ โดยยังสามารถช่วยลดกำลังสูญเสียได้ระดับหนึ่ง ก็คงต้องมีสมการที่

จะไปส่งผลต่อการใช้กำลังรีแอกทีฟของอุปกรณ์นั้นๆ สมการค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ หรือ SVC ถูกเพิ่มเข้าไปที่สมการกำลังสูญเสียที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเพิ่มในสมการแบบไม่เท่ากับของเงื่อนไขของสมการ OPF สมการที่จะเพิ่มเข้าไปเป็นไปตามสมการที่ (3.26)

$$BM_i = \left(\frac{(B_i - B_i^{\min}) - (B_i^{\max} - B_i)}{(B_i^{\max} - B_i^{\min})} \right)^2 \quad (3.26)$$

เพิ่มในสมการวัตถุประสงค์

$$\min P_L + \alpha \sum_i^{N_C} BM_i$$

เพิ่มเป็นเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_C} BM_i \leq SBM^{\max}$$

โดยที่ BM_i คือค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุหรือ SVC ตัวที่ i

B_i^{\min}, B_i^{\max} คือค่าขีดเซฟแดนซ์ต่ำสุดและสูงสุดของตัวเก็บประจุหรือ SVC

α คือตัวประกอบน้ำหนักค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุหรือ SVC

SBM^{\max} คือผลรวมสูงสุดของค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุหรือ SVC

จากสมการที่ (3.26) ค่า BM ที่น้อยแสดงให้เห็นว่าค่าขีดเซฟแดนซ์ของตัวเก็บประจุหรือ SVC ถูกใช้ใกล้ค่ากลางระหว่าง B^{\min} และ B^{\max} ทำให้มีค่าเหลือที่จะใช้ปรับตั้งเพื่อรักษาระดับแรงดันในกรณีเกิดเหตุบกพร่องในระบบ และตัวประกอบน้ำหนัก α ถูกคูณเข้าไปกับสมการเพื่อให้น้ำหนักความสำคัญของค่าเพื่อเช่นเดียวกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกำหนดความสำคัญได้ที่ค่าผลรวมสูงสุดของค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟ SBM^{\max} นอกจากนี้ใช้เป็นสมการค่าเพื่อของอุปกรณ์ที่ติดตั้งเดิมอยู่แล้วยังนำไปใช้ในกรณีที่ต้องการติดตั้ง SVC เพิ่มเติมเพื่อให้ใช้ขนาดที่ไม่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับการลดลงของกำลังสูญเสีย

3.4.3 การเพิ่มค่าเพื่อจำนวนชั้นของแท็ปหม้อแปลง

แท็ปของหม้อแปลงถูกนำมาใช้ในการปรับระดับแรงดันให้ได้ค่าที่ต้องการเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิด ฉะนั้นในสภาวะปกติควรมี

จำนวนชั้นแท็บเทียบกับหม้อแปลงทุกตัวโดยเหลือทั้งชั้นบนและชั้นล่าง เช่น เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงที่จุดหนึ่งๆ ที่ใกล้หม้อแปลงตัวใด หม้อแปลงตัวนั้นควรมีค่าแท็บที่จะช่วยปรับระดับแรงดันในระดับหนึ่ง ไม่ต้องใช้จากตัวที่อยู่ไกลออกไปทั้งหมด การบังคับการเปลี่ยนของแท็บจะมีผลต่อกำลังสูญเสียที่จะลดลง ซึ่งก็ต้องหาค่าที่ส่งผลต่อกำลังสูญเสียให้น้อยที่สุด สมการค่าเผื่อของแท็บหม้อแปลงจะถูกเพิ่มเข้าไปที่สมการกำลังสูญเสียที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเพิ่มในสมการแบบไม่เท่ากับของเงื่อนไขของสมการ OPF สมการที่จะเพิ่มเข้าไปเป็นไปตามสมการที่ (3.27)

$$TM_i = \left(\frac{(T_i - T_i^{\min}) - (T_i^{\max} - T_i)}{(T_i^{\max} - T_i^{\min})} \right)^2 \quad (3.27)$$

เพิ่มในสมการวัตถุประสงค์

$$\min P_L + \gamma \sum_i^{N_T} TM_i$$

เพิ่มเป็นเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_T} TM_i \leq STM^{\max}$$

โดยที่ TM_i คือค่าเผื่อชั้นแท็บของหม้อแปลงตัวที่ i

T_i^{\min}, T_i^{\max} คืออัตราส่วนแท็บต่ำสุดและสูงสุดของหม้อแปลง

γ คือตัวประกอบน้ำหนักค่าเผื่อชั้นแท็บของหม้อแปลง

STM^{\max} คือผลรวมสูงสุดของค่าเผื่อกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุหรือ SVC

จากสมการที่ (3.27) ค่า TM ที่น้อยแสดงให้เห็นว่าชั้นแท็บของหม้อแปลงถูกใช้ใกล้ค่ากลางระหว่าง T^{\min} และ T^{\max} ทำให้หม้อแปลงแต่ละตัวมีชั้นแท็บที่จะปรับขึ้นหรือปรับลงได้และตัวประกอบน้ำหนัก γ ถูกคูณเข้าไปกับสมการเพื่อให้น้ำหนักความสำคัญของค่าเผื่อเช่นเดียวกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสามารถกำหนดความสำคัญที่ค่าผลรวมสูงสุดของค่าเผื่อชั้นแท็บของหม้อแปลง STM^{\max}

3.5 การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์เพิ่มเติม

การติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อช่วยให้ระบบลดกำลังสูญเสียลงได้อีก หรือเพื่อให้ระบบมีความมั่นคงมากขึ้น แต่ปัญหาก็คือจะติดตั้งที่ตำแหน่งใด ถึงจะบรรลุดตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ดังนั้นการจัดลำดับตำแหน่งที่จะติดตั้งอุปกรณ์ที่จะต้องเกิดประโยชน์สูงสุดในการลดกำลังสูญเสีย โดยหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ 3 ชนิด ได้แก่ อุปกรณ์ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟ เช่น ตัวเก็บประจุและ SVC อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งนั่นคือ TCSC และ อุปกรณ์ที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าคือ UPFC

3.5.1 การจัดลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุและ SVC

กำลังสูญเสียที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งได้เป็นกำลังสูญเสียที่สัมพันธ์กับกระแสรีแอกทีฟและกำลังสูญเสียที่สัมพันธ์กับกระแสจริง การเพิ่มตัวเก็บประจุหรือ SVC เป็นการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าที่บัส ดังนั้นกลุ่มบัสที่สมควรจะถูกเลือกควรเป็นบัสที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียมากที่สุด เนื่องจากการลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าโดยการติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นการลดกำลังสูญเสียที่เกิดจากกระแสรีแอกทีฟ ดังนั้นต้องหว่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสใดส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียในระบบมากน้อยเพียงใด ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ ฉะนั้นจะต้องหาดัชนีจัดเรียงลำดับความสำคัญของบัสเพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ฉีดเข้าบัสกับกำลังสูญเสีย โดยทั่วไปการหาตำแหน่งติดตั้งให้กับอุปกรณ์ที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟจะหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับกำลังรีแอกทีฟที่บัส [17,18] ดังสมการที่ (3.28) โดยที่บัสใดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากก็จะเลือกติดอุปกรณ์ที่บัสนั้นแต่อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียเทียบกับกำลังรีแอกทีฟจะเป็นการบอกถึงอัตราที่ กำลังสูญเสียลดลงแต่ไม่อาจบอกได้ว่าที่บัสนั้นจะมีผลทำให้กำลังสูญเสียลดลงต่ำสุด

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} \frac{R_{ij}}{V_i V_j} [(P_i P_j + Q_i Q_j) \cos(\delta_i - \delta_j) + (Q_i P_j - P_i Q_j) \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^{NB} \frac{R_{ij}}{V_i V_j} (Q_j \cos(\delta_i - \delta_j) - P_j \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (3.28)$$

โดยที่ $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$

ในวิชานี้พันธบัตรนี้จะนำเสนอการหาค่าตัวเลขดัชนีจากความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียเทียบกับกระแสแอกติฟคูณกับผลรวมของกำลังรีแอกติฟที่มีผลกระทบเมื่อมีการจ่ายกระแสแอกติฟเข้าที่บัสนั้นๆ กำลังสูญเสียที่สัมพันธ์กับกระแสแสดงดังสมการที่ (3.29)

$$P_{Loss} = \sum_{n=1}^{NL} I_{ij}^2 r_n \quad (3.29)$$

โดยที่ I_{ij} คือกระแสที่ผ่านสายส่งลำดับ n ที่ต่อระหว่างบัส i และ j

r_n คือความต้านทานสายส่งลำดับ n

กระแสที่ไหลในสาย n ระหว่างบัส i และ j หาได้จาก

$$I_{ij} = \frac{(V_i - V_j)}{z_n}$$

กำหนดให้ $V = e + jf$, $z_n = r_n + jx_n$

$$I_{ij}^2 = \frac{(e_i - e_j)^2 + (f_i - f_j)^2}{(r^2 + x^2)}$$

$$P_{Loss} = \sum_{n=1}^{NL} \left(\frac{(e_i - e_j)^2 + (f_i - f_j)^2}{(r^2 + x^2)} \right) \times r_n$$

หรือกำลังสูญเสียแสดงดังสมการที่ (3.30)

$$P_{Loss} = \sum_{n=1}^{NL} ((e_i - e_j)^2 + (f_i - f_j)^2) \times g_n \quad (3.30)$$

$$\text{เมื่อ } g_n = \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่บัสหาได้จาก

$$V_i = \sum_{k=1}^{NB} Z_{ik} I_k$$

$$e_i + jf_i = \sum_{k=1}^{NB} (R_{ik} + jX_{ik}) \times (Ia_k + jIr_k)$$

$$e_i = \sum_{k=1}^{NB} (R_{ik} Ia_k - X_{ik} Ir_k) \quad , \quad f_i = \sum_{k=1}^{NB} (X_{ik} Ia_k + R_{ik} Ir_k)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียเทียบกับกระแสแอกติฟที่บัส k แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial Pr_{Loss}}{\partial Ir_k} = 2 \sum_{n=1}^{NL} \left(\begin{array}{l} (R_{ik} - R_{jk})(V_i \cos \delta_i - V_j \cos \delta_j) - \\ (X_{ik} - X_{jk})(V_i \sin \delta_i - V_j \sin \delta_j) \end{array} \right) g_n \quad (3.31)$$

$$\text{เมื่อ } Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$$

การติดตั้งอุปกรณ์ที่จ่ายกำลังรีแอกตีฟจะมีผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ติดต่อกับบัส นั้นๆ ดังนั้นการหาตำแหน่งที่เหมาะสมจะต้องนำกำลังรีแอกตีฟที่มีผลกระทบจากการจ่าย กำลังไฟฟ้รีแอกตีฟเข้าสู่บัสนั้นๆ คูณเข้ากับสมการที่ (3.31) ดังนี้ในการเลือกบัสที่จะติดตั้งแสดง ดังสมการที่ (3.32)

$$C_k^{index} = 2 \sum_{n=1}^{N_L} \left(\begin{array}{l} (R_{ik} - R_{jk})(V_i \cos \delta_i - V_j \cos \delta_j) \\ -(X_{ik} - X_{jk})(V_i \sin \delta_i - V_j \sin \delta_j) \end{array} \right) g_n \times \left[|Q_k| + \sum_{j=1}^{N_B} |Q_{kj}| \right] \quad (3.32)$$

โดยที่ C_k^{index} คือ ดัชนีความสำคัญของบัส k

Q_k คือ กำลังไฟฟ้รีแอกตีฟที่บัส k

Q_{kj} คือ กำลังไฟฟ้รีแอกตีฟที่ไหลระหว่างบัส k และบัส j

ลำดับความสำคัญของบัสจะจัดเรียงตามดัชนีที่มีตัวเลขจากมากไปน้อย ถ้าบัสใดมีตัวเลขมากเมื่อ ติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปก็จะส่งผลกระทบต่อการลดลงของกำลังสูญเสียมากกว่าบัสที่มีตัวเลขน้อย กรณีที่ ต้องการติดตั้งมากกว่า 1 ตัวก็จะเลือกลำดับที่ลดลงมาโดยไม่เลือกบัสที่ติดต่อกับบัสที่เลือกในลำดับ ก่อนหน้านี้

3.5.2 การจัดลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมของ TCSC

TCSC เป็นอุปกรณ์ที่ปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ดังนั้นการหาสายส่งที่จะ ติดตั้ง TCSC จะเป็นการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียต่อค่ารีแอกแตนซ์ โดยกำลัง สูญเสียที่สายส่งลำดับ n ที่ต่อระหว่างบัส i และ j เขียนได้ดังสมการที่ (3.33)

$$P_{Lossij} = I_{ij}^2 \times r_n \quad (3.33)$$

ส่วนสมการกระแสที่ไหลผ่านสายยกกำลังสองเขียนได้ตามสมการที่ (3.34)

$$I_{ij}^2 = \frac{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)}{r_n^2 + x_n^2} \quad (3.34)$$

แทนค่ากระแสยกกำลังสองในสมการที่กำลังสูญเสียที่สายส่งได้ตามสมการที่ (3.35)

$$P_{Lossij} = \left(\frac{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos(\delta_i - \delta_j)}{r_n^2 + x_n^2} \right) r_n \quad (3.35)$$

จะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียต่อค่ารีแอกแตนซ์ตามสมการที่ (3.36)

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial X_n} = \frac{-2r_n x_n}{(r_n^2 + x_n^2)^2} \times [V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

หรือ

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial X_n} = 2g_n b_n \times [V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.36)$$

เมื่อ

$$g_n = \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2}, \quad b_n = \frac{-x_n}{r_n^2 + x_n^2}$$

สมการที่(3.36) เป็นการบอกถึงสายส่งที่มีอัตราการลดลงของกำลังสูญเสียมากเมื่อมีการเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์สายส่งใดมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากก็เลือกติดตั้งที่สายส่งนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการที่จะได้ค่าดัชนีแสดงความสำคัญของสายส่งเพื่อเลือกติดตั้ง TCSC โดยหลักการคือนำกำลังสูญเสียของสายส่งที่พิจารณาบวกกับกำลังสูญเสียที่สายส่งที่ต่อกับสายส่งที่พิจารณาแล้วจึงนำไปคูณกับสมการที่(3.36) ก็จะได้สมการที่จะแสดงถึงความสำคัญของสายส่งในการลดกำลังสูญเสีย แสดงได้ตามสมการที่(3.37)

$$X_n^{index} = 2g_n b_n \times [V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \times \left(P_{Loss_n} + \sum_{j=1}^{N_k} P_{Loss_j} \right) \quad (3.37)$$

โดยที่ X_{index_n} คือ ดัชนีแสดงความสำคัญของสายส่ง n

P_{Loss_j} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สายส่ง j ที่ต่อกับสายส่ง n

N_k คือ จำนวนสายส่งที่ต่อกับสายส่ง n

โดยลำดับความสำคัญของสายส่งจะจัดเรียงตามดัชนีที่มีตัวเลขลบจากมากไปน้อย ถ้าสายส่งใดมีขนาดตัวเลขดัชนีมากเมื่อติดตั้ง TCSC ก็จะส่งผลต่อการลดลงของกำลังสูญเสียมากกว่าสายส่งที่มีตัวเลขน้อย เมื่อต้องการติดตั้งเพิ่มเติมมากกว่า 1 จุด ก็เลือกลำดับถัดไปโดยมีเงื่อนไขสำหรับสายส่งที่ห้ามเลือกได้แก่สายส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียที่สายส่งสูงสุดโดยเทียบกำลังสูญเสียจากกำลังสูญเสียก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC ของตัวก่อนหน้านี้ เพราะสายส่งที่มีการ

เปลี่ยนแปลงกำลังสูญเสียมากแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กับสายส่งที่ติดตั้ง TCSC อยู่แล้วจึงไม่ต้องไปติดตั้งอีก

3.5.3 การจัดลำดับตำแหน่งที่เหมาะสมของ UPFC

UPFC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าและควบคุมแรงดันที่บัสการหาจุดติดตั้งอาจพิจารณาจากความจำเป็นในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ หรือถ้าต้องการดูตามการลดลงของกำลังสูญเสียก็ต้องเทียบว่าที่สายและบัสใดติดตั้งแล้วกำลังสูญเสียมีอัตราการลดลงมากที่สุด ใช้สมการของการหาตำแหน่งของ SVC และ TCSC คูณกันแล้วเลือกตำแหน่งที่มีดัชนีมากที่สุดในการติดตั้งดังแสดงตามสมการที่ (3.38)

$$U_{ki}^{index} = C_k^{index} \times X_i^{index} \quad (3.38)$$

โดยที่ U_{ki}^{index} คือดัชนีความสำคัญของบัส k และสายส่ง i

โดยลำดับความสำคัญของสายจะจัดเรียงตามตัวเลขจากมากไปน้อย

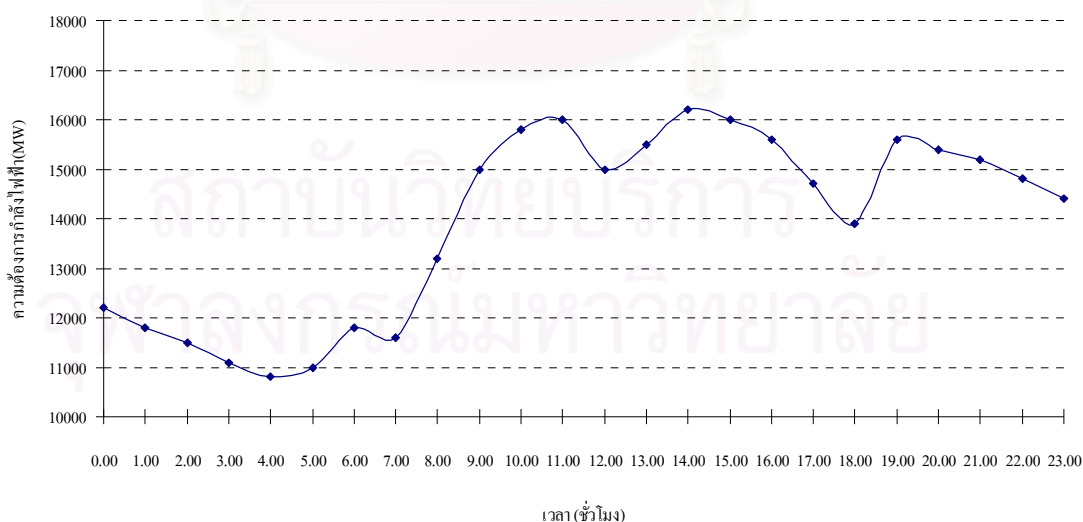
บทที่ 4

การวิเคราะห์ค่าปรับตั้งตามช่วงเวลา

การปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกทีฟเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าจะถูกระบุใช้กรณีปรับตั้งอุปกรณ์ควบคุมแบบตามช่วงเวลา(Real Time) โดยเป้าหมายหลักของการควบคุมกำลังรีแอกทีฟมีสามประการ[19] คือรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในย่านที่ยอมรับ ลดกำลังสูญเสียในสาย และควบคุมการปรับตั้งอุปกรณ์ที่เป็นแบบลำดับขั้น(discrete) ไม่ให้ถูกปรับตั้งบ่อยเกินไป ในบทนี้จะพิจารณาการปรับตั้งตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุมโดยพิจารณาการเปลี่ยนของโหลดตามช่วงเวลา เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้ง ทั้งแบบปรับตั้งคงที่ตลอดช่วงเวลา และแบบปรับเปลี่ยนค่าปรับตั้งเป็นลำดับตามช่วงเวลา

4.1 การปรับตั้งตัวแปรควบคุมคงที่ตลอดช่วงเวลา

โดยทั่วไปการหาค่าปรับตั้งเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าจะพิจารณาที่โหลดเต็มพิกัด เพื่อนำค่าปรับตั้งที่คำนวณได้มาใช้ตลอดช่วงเวลา ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการหาค่าปรับตั้งที่นำโหลดในช่วงเวลา มาพิจารณาด้วยแล้วนำค่าที่ได้ทดสอบปรับตั้งใช้ตลอดช่วงเวลา พิจารณารูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความต้องการการใช้กำลังไฟฟ้าในหนึ่งวันของประเทศไทยในวันที่ 23 เมษายน 2544 จากเอกสารการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้า ของคณะอนุกรรมการการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้า มกราคม 2545



รูปที่ 4.1 กราฟความต้องการการใช้กำลังไฟฟ้า(Daily Load Demand)

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าโหลดที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลามีค่าที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นการใช้ค่าปรับตั้งคงที่ตลอดต้องนำโหลดที่ช่วงเวลาต่างกันมาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อใช้วิเคราะห์ผลต่างของกำลังสูญเสีย และการปรับตั้งจะใช้ค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาจึงไม่ต้องคำนึงถึงลำดับการปรับตั้งของอุปกรณ์ หลักการที่ใช้คือการนำระดับโหลดต่างๆเพิ่มเข้าไปในระบบเสมือนว่ามีระบบเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าตามจำนวนของระดับโหลด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ระดับโหลดที่ต้องคงไว้ตลอดคือที่ระดับ 100% แล้วนำระดับโหลดอื่นมารวมพิจารณา สมการวัตถุประสงค์จะต้องเพิ่มจำนวนสายส่งแสดงดังสมการที่ 4.1

$$\min f(x) = \sum_k^{D \times NL} (P_{ij} + P_{ji}) \quad (4.1)$$

โดยที่ D คือจำนวนระดับโหลดที่นำมาพิจารณา

ส่วนสมการสมดุลของระบบไฟฟ้าก็มีรูปแบบเดิมเพียงแต่เพิ่มจำนวนบัสเข้าไปดังสมการที่ (4.2) และสมการ (4.3)

$$P_{Gi} + P_{si} - P_{Li} - P_i = 0 \quad (4.2)$$

$$Q_{Gi} + Q_{si} - Q_{Li} - Q_i = 0 \quad (4.3)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, D \times NB$

สมการที่ต้องเพิ่มเข้าไปเพื่อให้ตัวแปรควบคุมมีค่าเท่ากันทุกระดับโหลดเป็นไปตามสมการที่ (4.4) ซึ่งสมการนี้จะมีจำนวน $D-1$ สมการ และเพิ่มเป็นสมการแบบเท่ากับในสมการออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์

$$X_{ref.} - X_{Di} = 0 \quad (4.4)$$

โดยที่ $X_{ref.}$ คือตัวแปรควบคุมที่เป็นระดับโหลดอ้างอิง

X_{Di} คือตัวแปรควบคุมที่ระดับโหลด i

4.2 การปรับตั้งตัวแปรควบคุมเปลี่ยนตามช่วงเวลา

เมื่อโหลดเปลี่ยนตามช่วงเวลาการใช้ค่าปรับตั้งเดิมเป็นค่าปรับตั้งที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นถ้าต้องการลดกำลังสูญเสียในแต่ละช่วงเวลาให้ได้มากที่สุดก็จำเป็นที่จะต้องหาค่าปรับตั้งใหม่ในแต่ละช่วงเวลา แต่การปรับตั้งบ่อยๆ ไม่เป็นผลดีต่ออุปกรณ์โดยเฉพาะแท่นหม้อแปลงและ

ตัวเก็บประจุที่มีระบบทางกลมีผลทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นปัญหาที่ต้องนำมาพิจารณาก็คือ ความถี่ในการปรับ ตัวแปรที่เลือกปรับ และสุดท้ายคือการจัดลำดับการปรับตั้งของอุปกรณ์ควบคุม ที่ต่างชนิดกัน ในการหาค่าปรับตั้งยังคงต้องใช้หลักการเดียวกับการปรับตั้งตัวแปรควบคุมคงที่ ตลอดช่วงเวลา แต่จะพิจารณาในช่วงเวลาสั้นๆ ที่จะใช้ค่าปรับตั้งเดียวกัน

4.2.1 ความถี่ในการปรับตั้งตัวแปรควบคุม

ความสำคัญในการปรับตั้งอุปกรณ์ที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟเพื่อลดกำลังสูญเสีย คือความถี่ในการทำงาน โดยความถี่ในการปรับตั้งอาจจะเป็นนาฬิกาหรือช่วงหลายชั่วโมง ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความสำคัญขององค์ประกอบ เช่น ระดับการเปลี่ยนแปลงของโหลด ให้มีความสำคัญกับการลดกำลังสูญเสียหรือการควบคุมระดับแรงดัน หรือความต้องการขององค์กร โดยตัวแปรควบคุม แต่ละชนิดอาจมีความถี่ในการปรับตั้งที่ต่างกัน

ในการหาความถี่ปรับตั้งที่เหมาะสมต้องนำกราฟความต้องการกำลังไฟฟ้ามาพิจารณาร่วมด้วย จากรูปที่ 4.1 อัตราการเปลี่ยนของโหลดจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบคืออัตราการเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว เช่นในช่วงเวลา 7.00-11.00 น. และอัตราการเปลี่ยนโหลดช้า เช่น ช่วงเวลา 0.00-7.00 น. โดยข้อเท็จจริงแล้วการที่โหลดมีอัตราการเปลี่ยนเร็วควรที่จะมีความถี่ในการปรับตั้งมาก แต่ถ้าช่วงเวลาสั้นก็ต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่จะปรับตั้งอุปกรณ์นั้นๆ ในช่วงเวลาสั้นอาจจะต้องเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ที่ปรับตั้งได้รวดเร็วและไม่ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโหลดช้าอาจจะมีค่าความถี่ในการปรับตั้งน้อยลง แล้วเลือกอุปกรณ์ที่ปรับตั้งได้ช้าเข้ามาพิจารณาด้วยได้ โดยใช้ค่าปรับตั้งเดียวกันในช่วงเวลานั้นเพราะความต่างของโหลดไม่ทำให้กำลังสูญเสียต่างกันมาก อีกทั้งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็จะทดสอบเปรียบเทียบการปรับตั้งที่รูปแบบต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของกำลังสูญเสียเฉลี่ยในหนึ่งวัน

4.2.2 จำนวนอุปกรณ์ที่จะปรับเปลี่ยนในช่วงเวลา

อุปกรณ์ควบคุมที่ใช้ปรับตั้งแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบคือ แบบที่ควบคุมค่าเป็นลำดับขั้น เช่น แท้ปหม้อแปลง และตัวเก็บประจุ และแบบที่ควบคุมได้ต่อเนื่อง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า อุปกรณ์ประเภท FACTS โดยปกติแล้วการจ่ายกำลังรีแอกตีฟของอุปกรณ์มีค่าใช้จ่ายน้อย แต่ผลของการปรับสำหรับแบบที่ควบคุมค่าเป็นลำดับขั้นจะส่งผลต่ออุปกรณ์ตัดต่อที่ติดตั้งกับอุปกรณ์นั้นๆ และจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง เงื่อนไขที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกจำนวนอุปกรณ์ที่จะใช้ปรับตั้ง คือ จำนวนอุปกรณ์ที่ปรับตั้งต้องไม่มากเกินไป อุปกรณ์ที่จะนำมาปรับตั้งต้องสามารถ

ปรับตั้งได้ในช่วงเวลาที่ต้องการ และอุปกรณ์ปรับตั้งที่เป็นแบบลำดับขั้นไม่ควรมีความถี่ในการปรับตั้งมาก จากข้อกำหนดที่กล่าวมาจะต้องพิจารณาหาความสำคัญของอุปกรณ์ที่มีผลต่อการลดกำลังสูญเสีย โดยขั้นต้นต้องเลือกอุปกรณ์ที่จะปรับตั้ง แล้วคำนวณหาลำดับความสำคัญของอุปกรณ์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนของกำลังสูญเสียร่วมในการตัดสินใจ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการคำนวณลำดับความสำคัญของอุปกรณ์โดยการทดสอบสองช่วงเวลาแล้วมาเปรียบเทียบหาลำดับความสำคัญของอุปกรณ์ แสดงดังสมการที่ 4.5

$$N_{index} = |X_{T1} - X_{T2}| \quad (4.5)$$

โดยที่ X_{T1}, X_{T2} คือค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ที่เวลา T1 และ T2

N_{index} คือลำดับความสำคัญของอุปกรณ์

เลือกอุปกรณ์ที่มีค่าความสำคัญมากมาเป็นตัวเลือกที่จะปรับตั้ง โดยจะแบ่งตามชนิดของอุปกรณ์ ซึ่งต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่จะเลือกอุปกรณ์ตัวนั้นด้วย

4.2.3 ลำดับขั้นการปรับอุปกรณ์ที่ต่างชนิด

เมื่อได้จำนวนอุปกรณ์ที่จะปรับตั้งแล้วสิ่งที่จะต้องพิจารณาในลำดับถัดไปคือการจัดลำดับการปรับตั้งของอุปกรณ์ต่างชนิดกัน โดยสิ่งที่จะต้องพิจารณาไม่ใช่กำลังสูญเสียในขณะที่ปรับแต่จะพิจารณาถึงแรงดันเมื่อมีการจัดลำดับการปรับตั้งที่แตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการทดสอบเปรียบเทียบการจัดลำดับการปรับตั้งที่รูปแบบต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ โดยแบ่งอุปกรณ์ปรับตั้งที่ใช้ในระบบไฟฟ้าได้ 2 รูปแบบคือ แบบที่ปรับได้ต่อเนื่องและแบบที่ปรับเป็นลำดับขั้น การปรับตั้งจะต้องพิจารณาในกรณีที่จะปรับตั้งเมื่อโหลดเพิ่มและกรณีที่จะปรับตั้งเมื่อโหลดลดลง ถ้าการปรับตั้งไม่มีแรงดันออกนอกขีดจำกัดจะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการบอกลำดับการปรับตั้งที่เหมาะสม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงดังสมการที่ (4.6)

$$SDV_b = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{bi} - \bar{V}_b)^2} \quad (4.6)$$

โดยที่ SDV_b คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันที่บัส b

N คือจำนวนชนิดของอุปกรณ์ที่ปรับ

V_{bi} คือแรงดันบัส b เมื่อปรับอุปกรณ์ครั้งที่ i

\bar{V}_b คือค่าแรงดันเฉลี่ยที่บัส b

บทที่ 5

ตัวอย่างการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของการลดกำลังสูญเสีย

5.1 การทดสอบการทำงานของโปรแกรมการคำนวณออฟติมอลเพาเวอร์โฟลว์

โปรแกรมที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เขียนให้ทำงานบนโปรแกรม MATLAB ในการทดสอบโปรแกรมจะใช้กับระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE 14, 30, 57 บัส [20] ข้อมูลของระบบทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก และ IEEE 118, และ 300 บัส [21] สำหรับหัวข้อที่ทำการทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบผลของกำลังสูญเสียที่จะลดลงและขนาดของแรงดันที่อยู่นอกขอบเขตของ 0.95-1.05 pu. โดยเลือกปรับตั้งเฉพาะอุปกรณ์ที่มีในระบบอยู่แล้ว โดยการปรับแรงดันเป็นการควบคุมที่กำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่เกินขนาดพิกัดและการปรับแก้ห้อมแปลงกำหนดค่าอยู่ระหว่าง 0.9-1.1 ทำการทดสอบเป็น 4 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ใช้ค่าเดิมของระบบทดสอบ(Base Case) โดยการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์

กรณีที่ 2 จำนวนออฟติมอลเพาเวอร์โฟลว์โดยปรับแรงดันในช่วง 0.95-1.05 pu

กรณีที่ 3 จำนวนออฟติมอลเพาเวอร์โฟลว์โดยปรับแรงดันในช่วง 0.98-1.05 pu

กรณีที่ 4 จำนวนออฟติมอลเพาเวอร์โฟลว์โดยปรับแรงดันในช่วง 0.95-1.06 pu

ผลการทดสอบมีรายละเอียดแสดงดังนี้

ตารางที่ 5.1 กำลังสูญเสียของระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ	กำลังสูญเสีย (MW)			
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
IEEE 14 บัส	13.6185	13.8166	13.8188	13.5195
IEEE 30 บัส	18.3423	18.2244	18.2506	17.8134
IEEE 57 บัส	20.9776	18.151	18.1732	17.7575
IEEE 118 บัส	132.4281	117.2648	117.2648	114.8943
IEEE 300 บัส	407.5566	378.999	380.5764	370.3364

ตารางที่ 5.2 จำนวนแรงดันบั๊สที่อยู่นอกขอบเขต

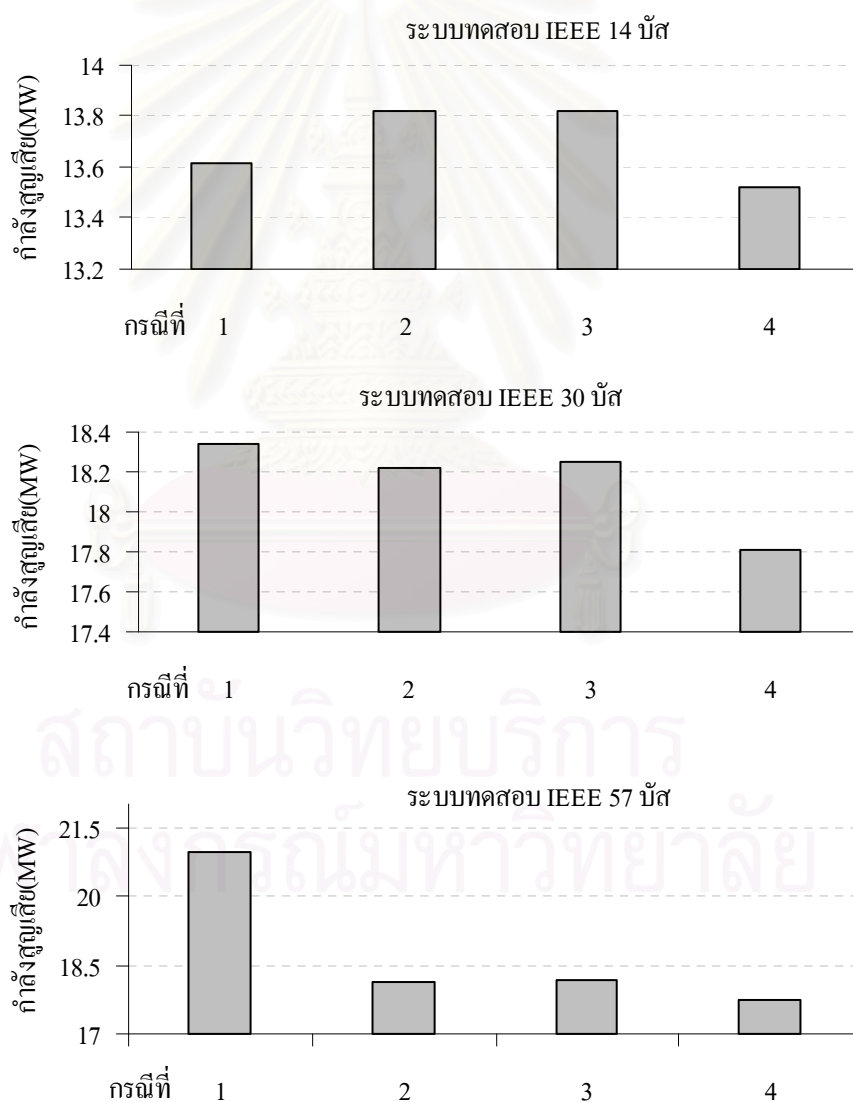
ระบบทดสอบ	จำนวนแรงดันบั๊สที่อยู่นอกขอบเขต							
	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2		กรณีที่ 3		กรณีที่ 4	
	<0.95	>1.05	<0.95	>1.05	<0.98	>1.05	<0.95	>1.05
IEEE 14 บั๊ส	0	4	0	0	0	0	0	2
IEEE 30 บั๊ส	0	2	0	0	0	0	0	3
IEEE 57 บั๊ส	3	2	0	0	0	0	0	8
IEEE 118 บั๊ส	3	0	0	0	0	0	0	40
IEEE 300 บั๊ส	13	31	0	0	0	0	0	112

ตารางที่ 5.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรม

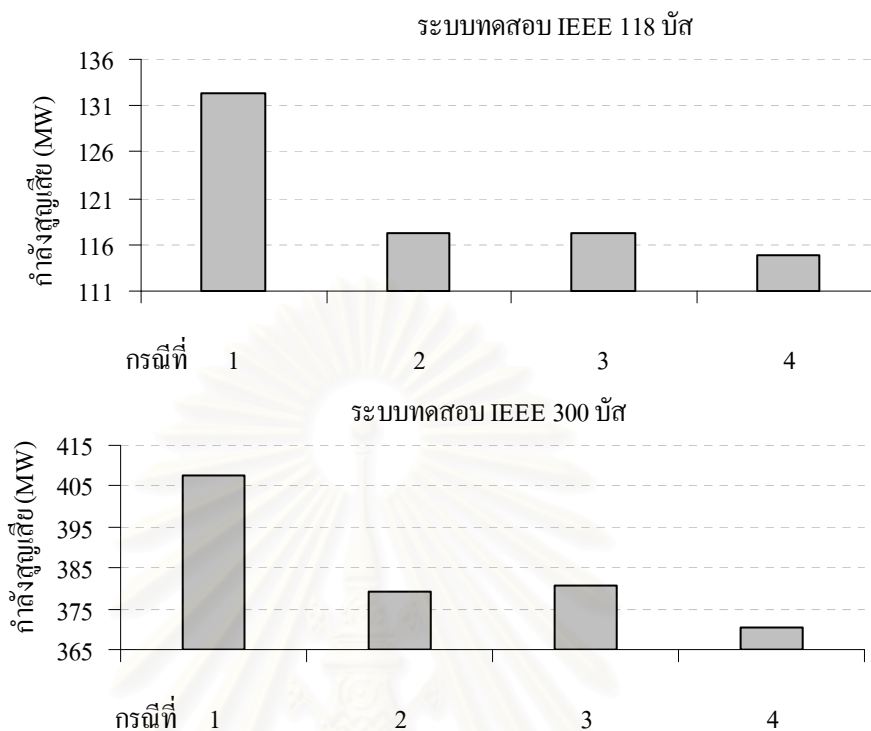
ระบบทดสอบ	ค่าความคลาดเคลื่อน							
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2		กรณีที่ 3		กรณีที่ 4		
	Max.Mismatches	KKT	Cgap	KKT	Cgap	KKT	Cgap	
IEEE 14 บั๊ส	8.88×10^{-15}	1×10^{-9}	9×10^{-9}	5×10^{-10}	2×10^{-9}	1×10^{-14}	1×10^{-9}	
IEEE 30 บั๊ส	8.99×10^{-15}	2×10^{-11}	2×10^{-10}	6×10^{-10}	1×10^{-9}	5×10^{-10}	5×10^{-9}	
IEEE 57 บั๊ส	2.42×10^{-12}	3×10^{-10}	2×10^{-9}	4×10^{-9}	7×10^{-9}	4×10^{-11}	2×10^{-10}	
IEEE 118 บั๊ส	3.84×10^{-14}	1×10^{-10}	2×10^{-9}	3×10^{-12}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	5×10^{-11}	
IEEE 300 บั๊ส	1.34×10^{-12}	1×10^{-10}	3×10^{-10}	2×10^{-11}	1×10^{-10}	1×10^{-11}	5×10^{-11}	

ตารางที่ 5.1 แสดงกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้าพิจารณาระบบทดสอบ IEEE 14 และ 30 บั๊ส ในกรณีที่ 1 และ 3 ปรับตั้งตามค่าเดิมจะส่งผลให้มีกำลังสูญเสียที่น้อยกว่าการปรับตั้งใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากค่าปรับตั้งเดิมได้ปรับตั้งที่ค่าแรงดันนอกขอบเขตที่ได้กำหนดในโปรแกรมซึ่งตั้งไว้ที่ 0.95-1.05 pu. และแสดงจำนวนค่าแรงดันที่อยู่นอกขอบเขตตามตารางที่ 5.2 จะสังเกตได้ว่าที่กรณีที่ 4 เป็นกรณีที่มีแรงดันเกิน 1.05 จำนวนมากเนื่องจากการทดสอบเพิ่มขอบเขตของแรงดันเพื่อเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่จะลดลงกับกรณีที่ 1 ซึ่งผลที่ได้ก็จะเห็นว่ากำลังสูญเสียลดลงจากค่าปรับตั้งเดิม สำหรับตารางที่ 5.3 เป็นการแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่ใช้ตรวจสอบค่าที่เหมาะสม

กรณีที่ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นค่าของสมการสมดุลของระบบไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ สำหรับการคำนวณออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์จะต้องตรวจสอบเงื่อนไขจำเป็นของ KKT ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบตามเงื่อนไขของ KKT ส่วนหนึ่งเป็นสมการสมดุลของกำลังไฟฟ้าที่เหมือนกับการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ แต่มีสมการที่สร้างจากเงื่อนไขอื่นๆประกอบด้วย เช่น จีคจำกัดของอุปกรณ์ควบคุม ค่าตรวจสอบจะน้อยกว่าค่าที่ตั้งซึ่งอยู่ที่ 1×10^{-8} การตรวจสอบตามเงื่อนไขของ KKT ยังไม่สามารถกล่าวได้ว่าสมการวัตถุประสงค์ได้ค่าที่ดีที่สุด จะต้องตรวจสอบค่า Complementary gap ให้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งโดยในโปรแกรมตั้งที่ 1×10^{-8} ในขั้นตอนต่อไปก็จะนำโปรแกรมไปคำนวณหาค่าปรับตามเงื่อนไขที่ต้องการศึกษา



รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังสูญเสียของโปรแกรมออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์



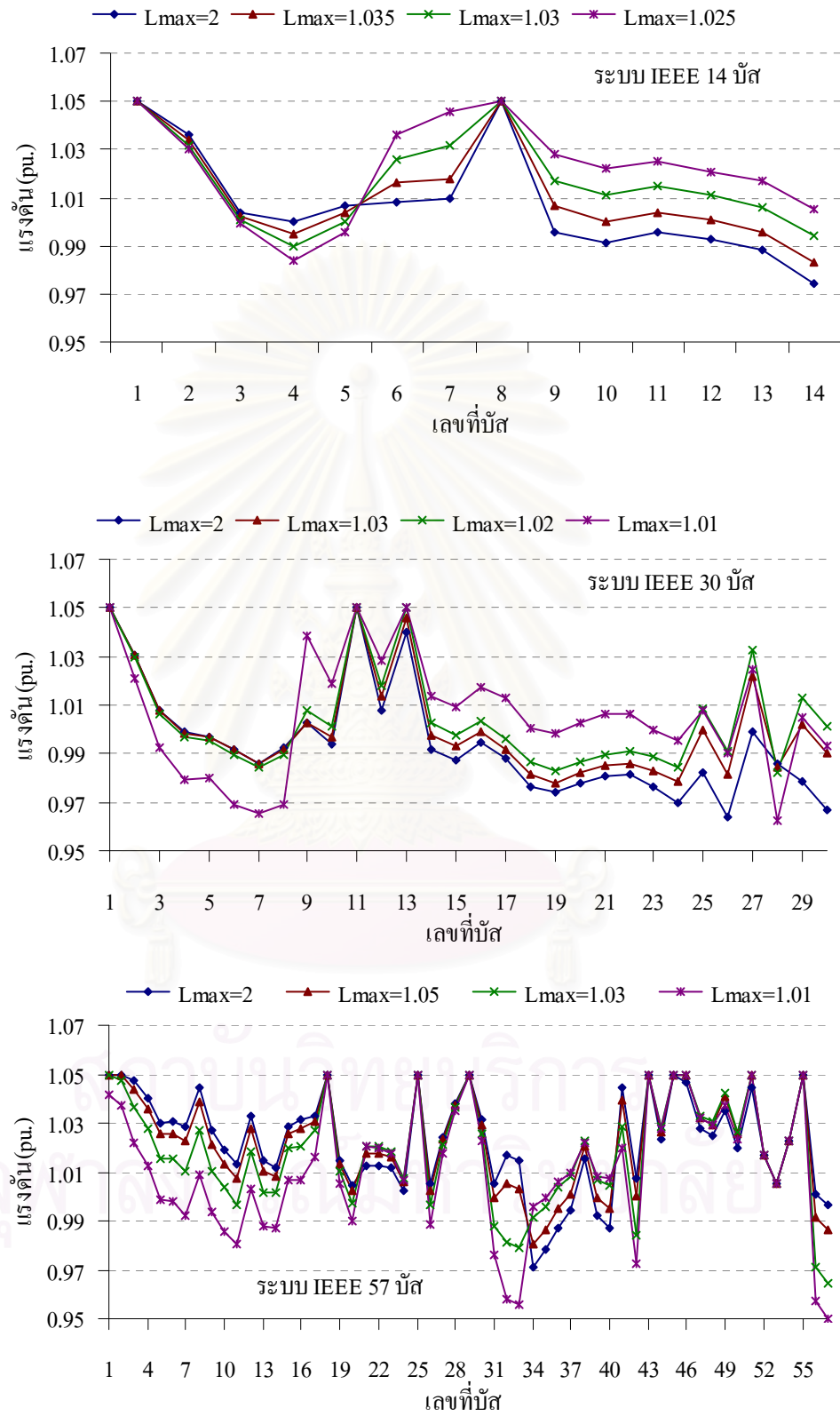
รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังสูญเสียของโปรแกรมออฟติไมเซอร์โพลีโวลต์ (ต่อ)

5.2 ผลการวิเคราะห์ดัชนีบ่งชี้ความมีเสถียรภาพของแรงดัน

การทดสอบจะจำลองให้บัสที่มีค่าแรงดันต่ำที่สุด เป็นบัสที่ต้องเพิ่มระดับความมั่นคงของแรงดันได้แก่บัสที่ 14 บัสที่ 26 และบัสที่ 34 สำหรับระบบทดสอบ IEEE 14 บัส IEEE 30 บัส และ IEEE 57 บัส ตามลำดับ โดยการเพิ่มค่า L_{max} แล้วดูผลของแรงดันทั้งระบบ ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อปรับลดค่า L_{max} แสดงในตารางที่ 5.4 และแรงดันที่เกิดจากการเปลี่ยน L_{max} แสดงดังรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.4 กำลังสูญเสียเมื่อปรับค่า L_{max}

IEEE 14 บัส		IEEE 30 บัส		IEEE 57 บัส	
L_{max}	กำลังสูญเสีย(MW)	L_{max}	กำลังสูญเสีย(MW)	L_{max}	กำลังสูญเสีย(MW)
2	13.8137	2	18.2219	2	18.1499
1.035	13.859	1.03	18.2532	1.05	18.1896
1.03	13.9543	1.02	18.2941	1.03	18.4542
1.025	14.0989	1.01	18.6838	1.01	19.0691



รูปที่ 5.2 ระดับแรงดันที่บัส

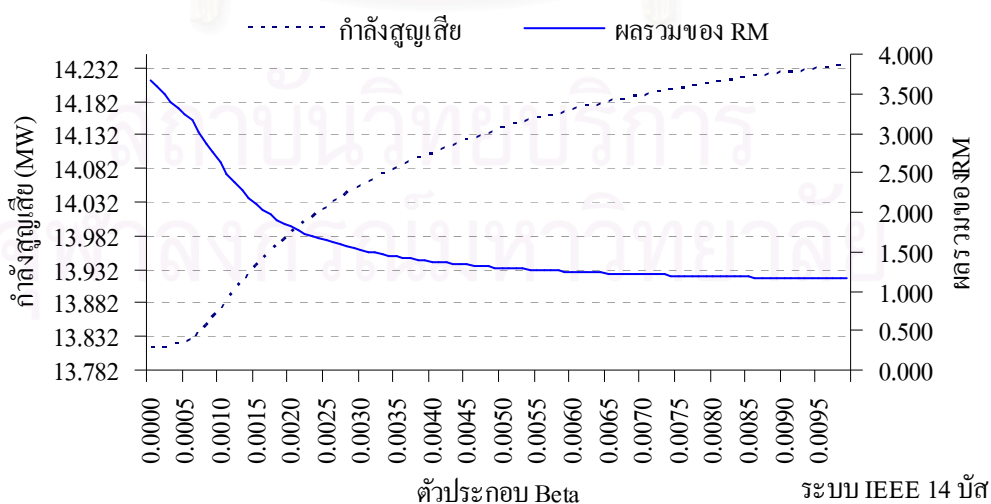
จากการทดสอบลดค่า L_{max} จะส่งผลให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบต้องใช้ค่าปรับตั้งบางส่วนไปใช้ในการเพิ่มค่าแรงดันของบัสที่ต้องการเพิ่มความมั่นคง โดยจากรูปจะเห็นว่าแรงดันที่บัสที่ต้องการเพิ่มความมั่นคงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่สถานะโหลดปัจจุบันค่าดัชนี L ของทั้ง 3 ระบบมีค่าใกล้กับ 1 นั้นแสดงให้เห็นว่าแรงดันอยู่ห่างจากจุดที่จะทำให้เกิดแรงดันไม่เสถียรภาพ

5.3 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่ออุปกรณ์

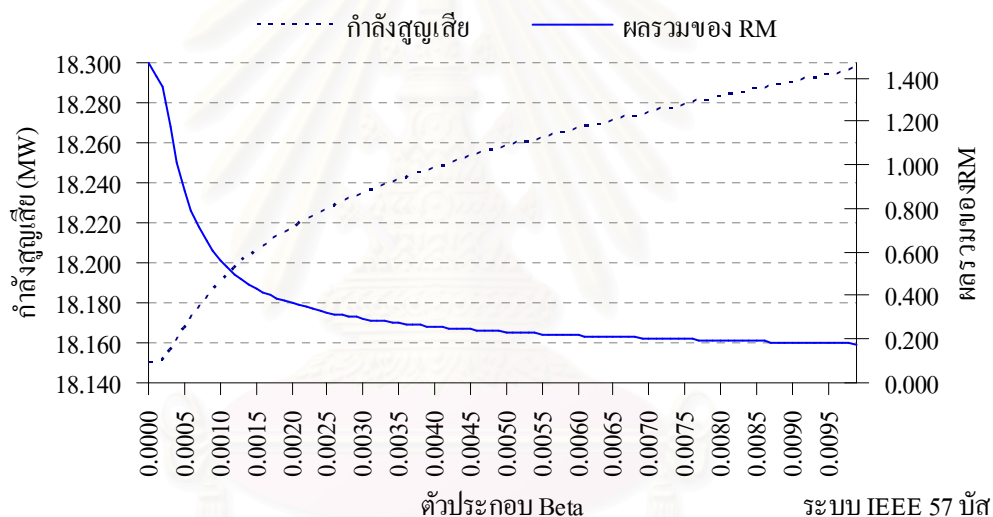
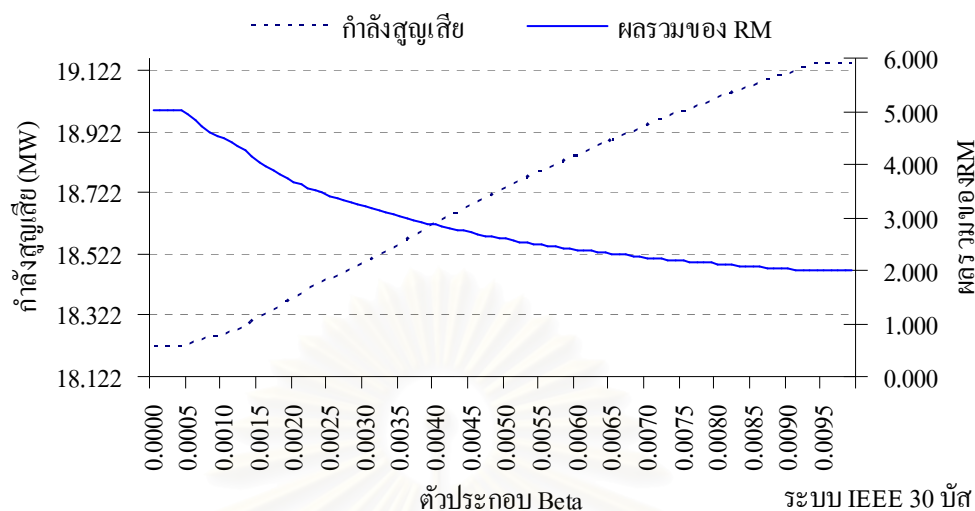
การเพิ่มค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ควบคุมก็เพื่อหลีกเลี่ยงค่าที่จะปรับตั้งในกรณีที่เกิดปัญหาการบกพร่องในระบบ โดยจะพิจารณา 3 ชนิด คือ ค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ และค่าเพื่อขึ้นของเทปหม้อแปลงแบบปรับได้ตามโหลด โดยการเพิ่มสมการเข้าไปที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการแบบไม่เท่ากับ การทดสอบจะทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 14 บัส IEEE 30 บัส และ IEEE 57 บัส

5.3.1 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อเพิ่มสมการที่ (3.25) เข้าไปที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ยังไม่จำเป็นต้องเพิ่มเข้าที่สมการแบบไม่เท่ากับและปรับค่า β ได้ผลดังตามรูปที่ 5.3 และจากทั้ง 3 ระบบ ค่า SRM ลดลงเมื่อเพิ่มค่า β ในขณะที่กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นและเมื่อค่า β เข้าใกล้ 1 จะทำให้ SRM ลดลงด้วยอัตราที่ช้าในขณะที่กำลังสูญเสียเพิ่มในอัตราเท่าเดิม ค่า β ที่เริ่มส่งผลให้ SRM ลดลงด้วยอัตราที่ช้าของทั้ง 3 ระบบไม่เท่ากัน ดังนั้นการหาค่า β ที่เหมาะสมจึงคำนวณได้ยาก



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟ



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อกำลังรีแอกทีฟ(ต่อ)

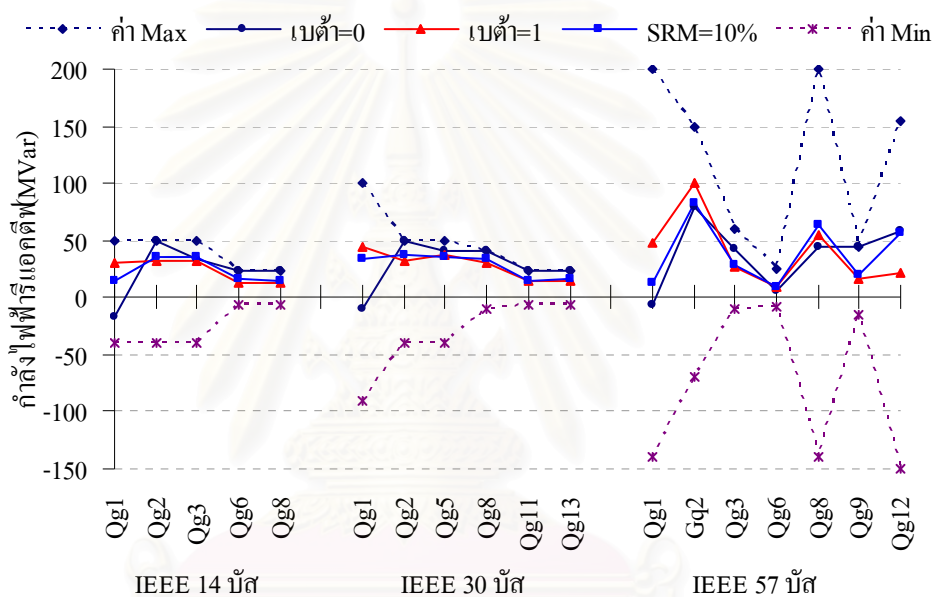
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมในรูปแบบใหม่คือการเลือกค่า SRM^{\max} โดยการเพิ่มสมการที่ (3.25) เข้าที่สมการเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับกำหนดให้ $\beta=0$ และเลือกค่า SRM^{\max} ที่ 10% ของช่วงระหว่างค่า SRM ที่ $\beta = 1$ และ SRM ที่ $\beta = 0$ แสดงการหาค่า SRM^{\max} ได้ดังนี้

$$SRM^{\max} = SRM_{\beta=1} + 0.1 \times [SRM_{\beta=0} - SRM_{\beta=1}]$$

ตารางที่ 5.5 แสดงกำลังสูญเสียเมื่อ $\beta = 1, \beta = 0$ และ $SRM^{\max} = 10\%$ รูปที่ 5.4 แสดงค่าปรับตั้งของกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของทั้งสามกรณีของทั้งสามระบบ

ตารางที่ 5.5 กำลังสูญเสียเมื่อ $\beta = 0$, $\beta = 1$ และ $SRM^{max} = 10\%$

ระบบทดสอบ	กำลังสูญเสีย (MW)			SRM^{max}
	$\beta = 0$	$SRM^{max} = 10\%$	$\beta = 1$	
IEEE 14 บัส	13.814	14.120	14.415	1.3407
IEEE 30 บัส	18.222	18.941	19.314	2.2359
IEEE 57 บัส	18.150	18.276	18.908	0.2029



รูปที่ 5.4 ค่าปรับตั้งกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สมการค่าเพื่อที่เพิ่มเข้าไปจะเป็นผลทำให้กำลังรีแอกตีฟในแต่ละเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฉลี่ยการจ่ายให้มากที่สุด นั่นคือตัวที่ใช้กำลังรีแอกตีฟห่างจากค่าสูงสุดก็จะจ่ายเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวที่ใช้กำลังเข้าใกล้ค่าสูงสุดก็จะจ่ายลดลง

5.3.2 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่อกำลังรีแอกตีฟของตัวเก็บประจุหรือ SVC

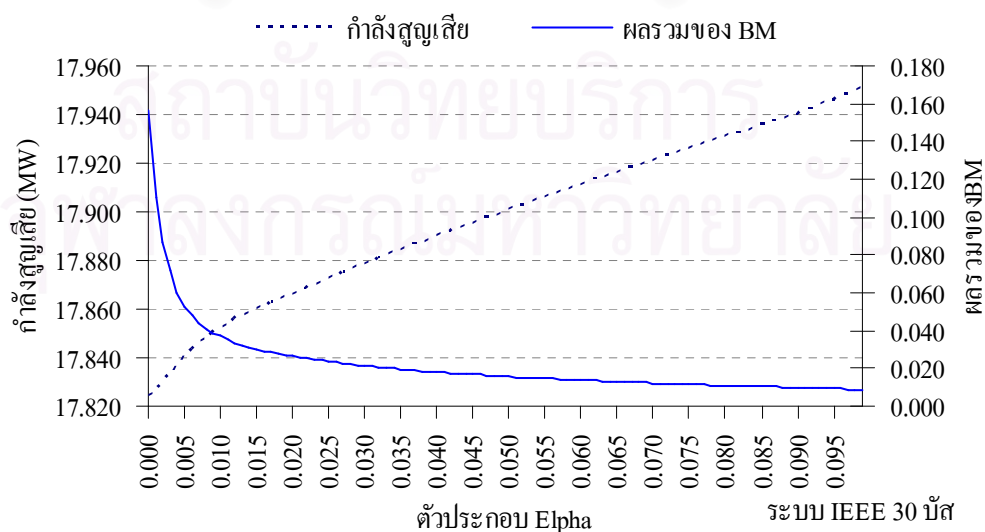
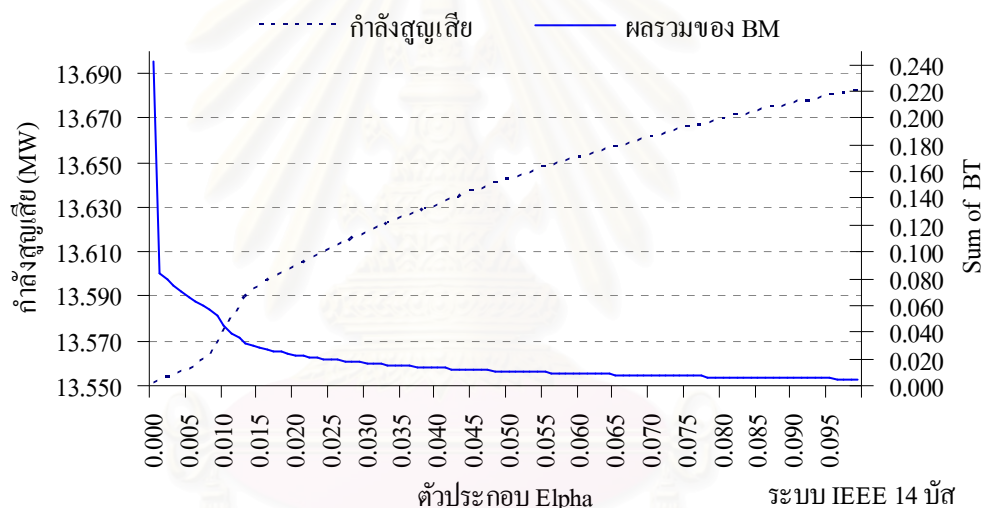
การทดสอบได้ติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มระบบละ 2 บัสให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 0.5 pu. และค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.5 pu. เมื่อเพิ่มสมการที่ (3.26) ที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยไม่ต้องเพิ่มเข้าสมการแบบไม่เท่ากับและปรับเพิ่ม α ได้ผลดังตามรูปที่ 5.5 และทั้ง 3 ระบบ ค่า SBM ลดลงเมื่อเพิ่มค่า α ในขณะที่กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นและเมื่อค่า α เข้าใกล้ 1 จะทำให้ SBM ลดลงด้วยอัตราที่ช้า

ในขณะที่กำลังสูญเสียเพิ่มในอัตราเท่าเดิม ค่า α ที่เริ่มส่งผลให้ SBM ลดลงด้วยอัตราที่ช้าของทั้ง 3 ระบบไม่เท่ากัน ดังนั้นการหาค่า α ที่เหมาะสมจึงทำได้ยาก

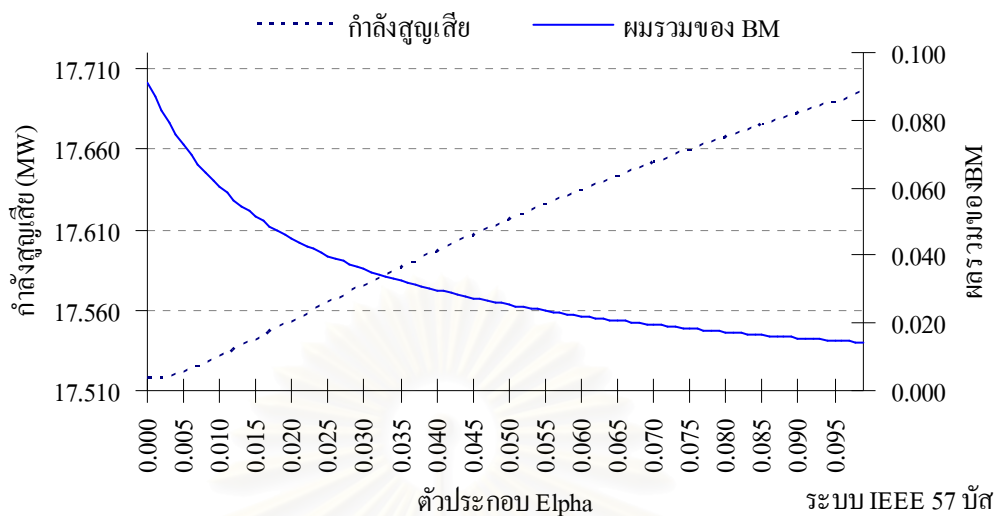
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมในรูปแบบใหม่คือการเลือกค่า SBM^{\max} โดยการเพิ่มสมการที่ (3.26) เข้าที่สมการเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับกำหนดให้ $\alpha=0$ และเลือกค่า SBM^{\max} ที่ 10% ของช่วงระหว่างค่า SBM ที่ $\alpha = 1$ และ SRM ที่ $\alpha = 0$ แสดงการหาค่า SBM^{\max} ได้ดังนี้

$$SBM^{\max} = SBM_{\alpha=1} + 0.1 \times [SBM_{\alpha=0} - SBM_{\alpha=1}]$$

ตารางที่ 5.6 แสดงกำลังสูญเสียเมื่อ $\alpha = 1$, $\alpha = 0$ และ $SBM^{\max} = 10\%$ รูปที่ 5.6 แสดงค่าปรับตั้งซีฟแซฟแดนซ์ของตัวเก็บประจุทั้งสามกรณีของทั้งสามระบบ



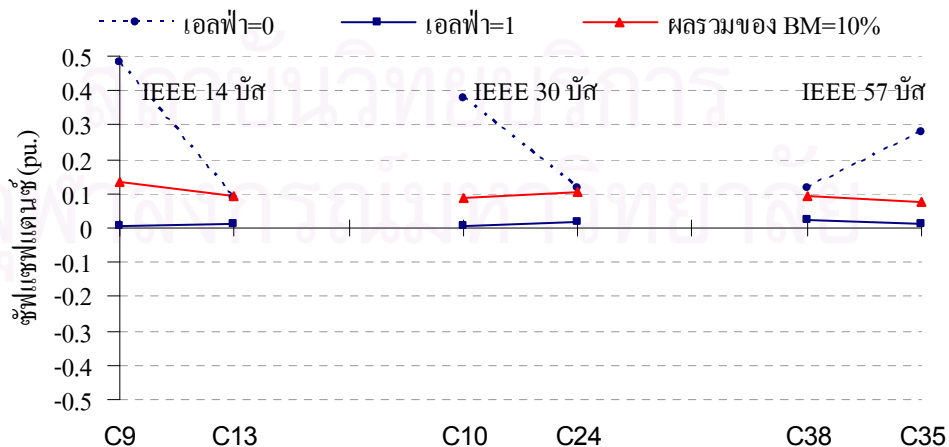
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อซีฟแซฟแดนซ์



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อชฟแซฟแดนซ์(ต่อ)

ตารางที่ 5.6 กำลังสูญเสียเมื่อ $\alpha = 0$, $\alpha = 1$ และ $SBM^{\max} = 10\%$

ระบบทดสอบ	กำลังสูญเสีย (MW)			SBM^{\max}
	$\alpha = 0$	$SBM^{\max} = 10\%$	$\alpha = 1$	
IEEE 14 บัส	13.551	13.598	13.789	0.0255
IEEE 30 บัส	17.824	17.888	18.154	0.0186
IEEE 57 บัส	17.517	17.695	18.031	0.0142



รูปที่ 5.6 ค่าชฟแซฟแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

ค่าชฟแซฟแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะเฉลี่ยการจ่าย นั่นคือตัวที่ใช้กำลังรีแอกตีฟห่างจากค่าสูงสุดก็จะจ่ายเพิ่มขึ้นในขณะที่ตัวที่ใช้กำลังเข้าใกล้ค่าสูงสุดก็จะจ่ายลดลง การเพิ่มค่าเพื่อจะทำได้ง่ายกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพราะเป็นอุปกรณ์เสริม

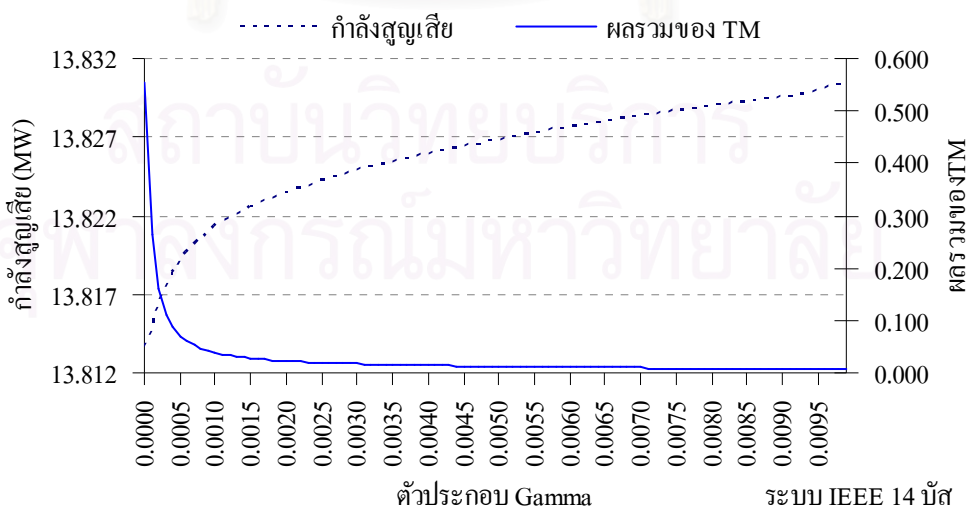
5.3.3 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มค่าเพื่อจำนวนชั้นของแท็บหม้อแปลง

หม้อแปลงที่ปรับแท็บได้ถูกติดตั้งในทั้งสามระบบอยู่แล้ว เมื่อเพิ่มสมการที่ (3.27) ที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยไม่ต้องเพิ่มเข้าสมการแบบไม่เท่ากับและปรับเพิ่ม γ ได้ผลดังตามรูปที่ 5.7 และทั้ง 3 ระบบ ค่า STM ลดลงเมื่อเพิ่มค่า γ ในขณะที่กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นและเมื่อค่า γ เข้าใกล้ 1 จะทำให้ STM ลดลงด้วยอัตราที่ช้าในขณะที่กำลังสูญเสียเพิ่มในอัตราเท่าเดิม ค่า γ ที่เริ่มส่งผลให้ STM ลดลงด้วยอัตราที่ช้าของทั้ง 3 ระบบไม่เท่ากัน ดังนั้นการหาค่า γ ที่เหมาะสมจึงทำได้ยาก

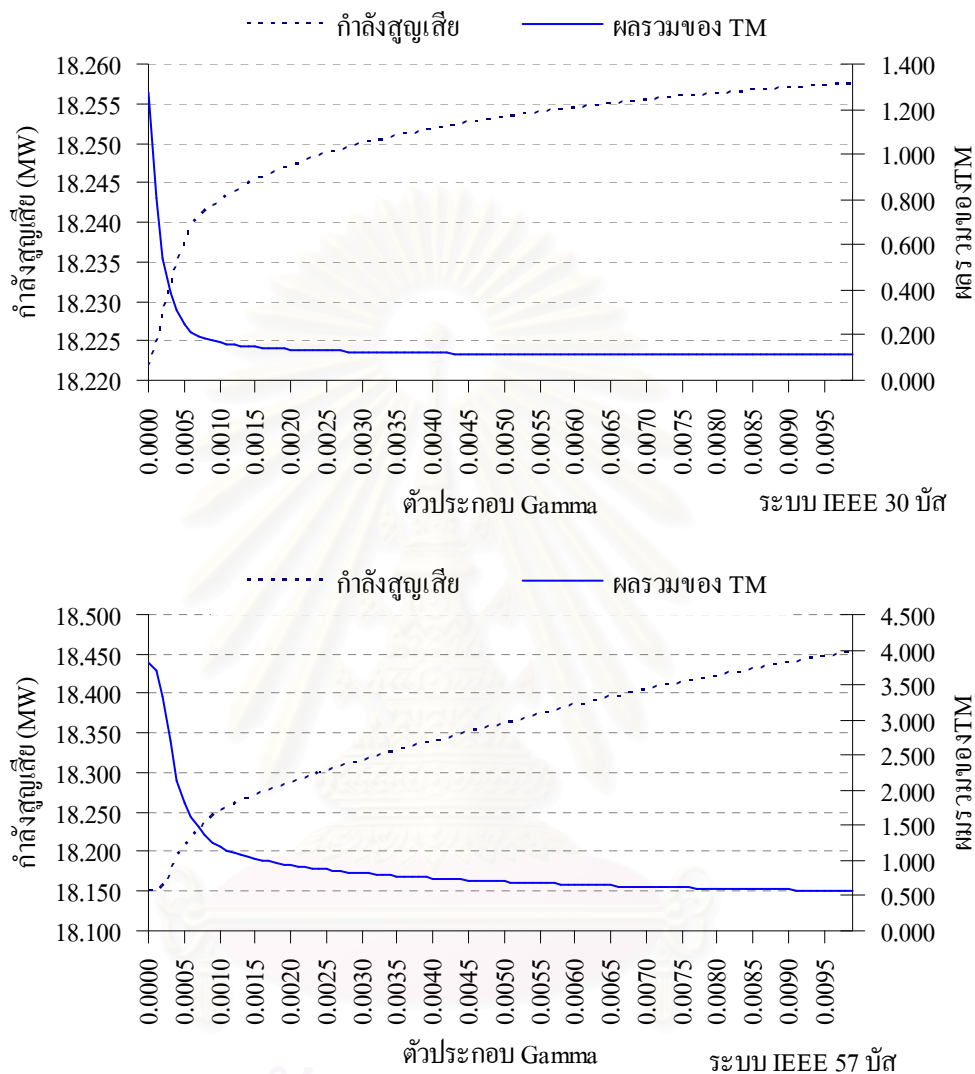
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมในรูปแบบใหม่คือการเลือกค่า STM^{max} โดยการเพิ่มสมการที่ (3.27) เข้าที่สมการเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับกำหนดให้ $\gamma=0$ และเลือกค่า STM^{max} ที่ 10% ของช่วงระหว่างค่า STM ที่ $\gamma = 1$ และ STM ที่ $\gamma = 0$ แสดงการหาค่า STM^{max} ได้ดังนี้

$$STM^{max} = STM_{\gamma=1} + 0.1 \times [STM_{\gamma=0} - STM_{\gamma=1}]$$

ตารางที่ 5.7 แสดงกำลังสูญเสียเมื่อ $\gamma = 1$, $\gamma = 0$ และ $STM^{max} = 10\%$ รูปที่ 5.8 แสดงค่าปรับตั้งแท็บหม้อแปลงทั้งสามกรณีของทั้งสามระบบ



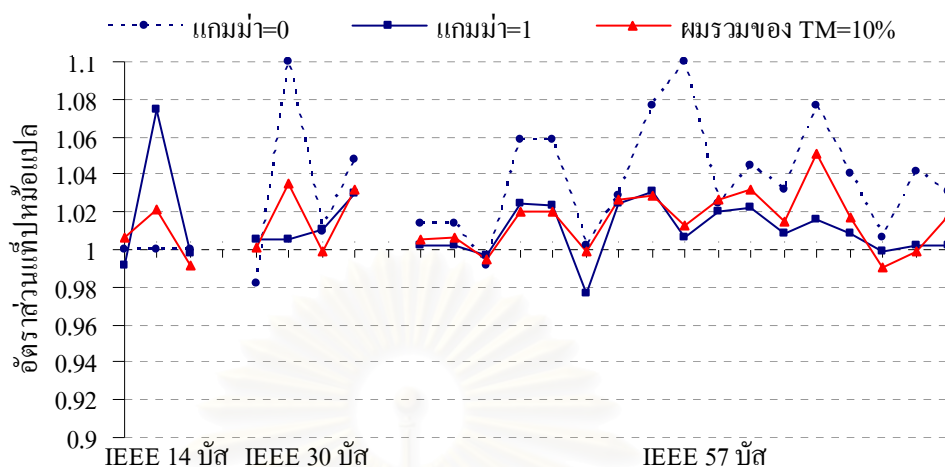
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง γ กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อชั้นแท็บหม้อแปลง



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง γ กับกำลังสูญเสียและผลรวมค่าเพื่อขึ้นแท๊ปหม้อแปลง(ต่อ)

ตารางที่ 5.7 กำลังสูญเสียเมื่อ $\gamma = 0$, $\gamma = 1$ และ $STM^{\max} = 10\%$

ระบบทดสอบ	กำลังสูญเสีย (MW)			STM^{\max}
	$\gamma = 0$	$STM^{\max} = 10\%$	$\gamma = 1$	
IEEE 14 บัส	13.816	13.82	13.846	0.055
IEEE 30 บัส	18.231	18.239	18.266	0.224
IEEE 57 บัส	18.244	18.326	18.723	0.786



รูปที่ 5.8 อัตราส่วนแท่งหม้อแปลง

หม้อแปลงทุกตัวจะถูกควบคุมให้เฉลี่ยการปรับขึ้นแท่งนั้นคือตัวที่ห่างจากค่าสูงสุดหรือต่ำสุดก็จะปรับมากขึ้น ในขณะที่ตัวที่อยู่ใกล้ค่าขอบเขตก็จะปรับลดลง การหาค่าเพื่อจะทำได้ง่ายที่สุดเพราะมีช่วงที่ค่าเพื่อลดลงได้มากตามที่กล่าวมาข้างต้น

จากผลการทดสอบการหาค่าอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าการปรับเพิ่มค่าเพื่อของอุปกรณ์จะมีผลต่อการลดลงของกำลังสูญเสียซึ่งเป็นเป้าหมายหลักแต่ถ้าค่าเพื่อลดลงในอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับการเพิ่มของกำลังสูญเสียก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจมาพิจารณาพร้อมด้วยเช่นของแท่งหม้อแปลงที่มีค่าเพื่อลดลงในอัตราที่สูงทำให้แท่งของหม้อแปลงสามารถถูกใช้งานไปในทางขีดจำกัดบนและในทางขีดจำกัดล่างได้หลายขั้นมากขึ้น การกำหนดความสำคัญของค่าเพื่อทำได้โดยการปรับค่าน้ำหนักประกอบแต่การหาค่าที่เหมาะสมทำได้ยาก การเพิ่มสมการแบบไม่เท่ากับและกำหนดค่าสูงสุดของผลรวมค่าเพื่อเป็นอีกทางเลือกที่จะได้ค่าเพื่อของอุปกรณ์ที่ยังคงลดกำลังสูญเสียได้ด้วย

5.4 ตัวอย่างการทดสอบการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม

การทดสอบจะใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 ,30 และ 57 บัส โดยจะหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งตัวเก็บประจุหรือ SVC TCSC และ UPFC

5.4.1 ผลการทดสอบหาจุดติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับตัวเก็บประจุหรือ SVC

การหาค่าตำแหน่งบัสที่เหมาะสมจะพิจารณาตามแนวทางที่ได้เสนอตามสมการที่ (3.32) เปรียบเทียบผลกับการเลือกบัส โดยใช้สมการที่(3.28) และการทดสอบติดตั้งทุกบัสเขียนเป็น

กราฟเพื่อจัดลำดับเปรียบเทียบผลกับสมการที่นำเสนอ สำหรับตัวเก็บประจุตั้งค่าต่ำสุดเป็น -0.5 pu และสูงสุดที่ 0.5 pu. และพารามิเตอร์ของ SVC กำหนดให้ X_C มีค่า 0.9 pu. และ X_L มีค่า 0.45 pu ในขั้นต้นต้องทำการหาค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ที่มีอยู่ในระบบ ผลการคำนวณหาดัชนีตามสมการที่ (3.28) และสมการที่(3.32) แสดงดังตารางที่ 5.8 ค่าปรับตั้งและกำลังสูญเสียในกรณีติดตั้ง 1 บัส แสดงในตารางที่ 5.9 และในกรณีติดตั้ง 2 จุด แสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.8 ดัชนีตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุหรือ SVC

ลำดับ	IEEE 14 บัส				IEEE 30 บัส				IEEE 57 บัส			
	สมการที่ (3.28)		สมการที่นำเสนอ		สมการที่ (3.28)		สมการที่นำเสนอ		สมการที่ (3.28)		สมการที่นำเสนอ	
	บัส	ดัชนี	บัส	ดัชนี	บัส	ดัชนี	บัส	ดัชนี	บัส	ดัชนี	บัส	ดัชนี
1	14	0.0159	9	0.0050	26	0.0452	10	0.0050	33	0.0526	38	0.0076
2	10	0.0131	14	0.0041	30	0.0415	21	0.0045	32	0.0510	35	0.0064
3	9	0.0128	7	0.0039	29	0.0373	24	0.0041	31	0.0397	37	0.0063
4	7	0.0071	4	0.0035	25	0.0316	11	0.0040	34	0.0322	36	0.0053
5	8	0.0069	13	0.0028	27	0.0296	9	0.0039	57	0.0307	30	0.0042

จากค่าดัชนีของทั้งสามระบบการติดตั้ง 1 จุด จะเลือกบัสที่มีค่าดัชนีเป็นลำดับที่ 1 และเมื่อต้องการติดตั้ง 2 จุดก็เลือกบัสที่มีค่าดัชนีรองลงมาแต่ต้องไม่เป็นบัสที่ติดต่อกันทางสายส่ง

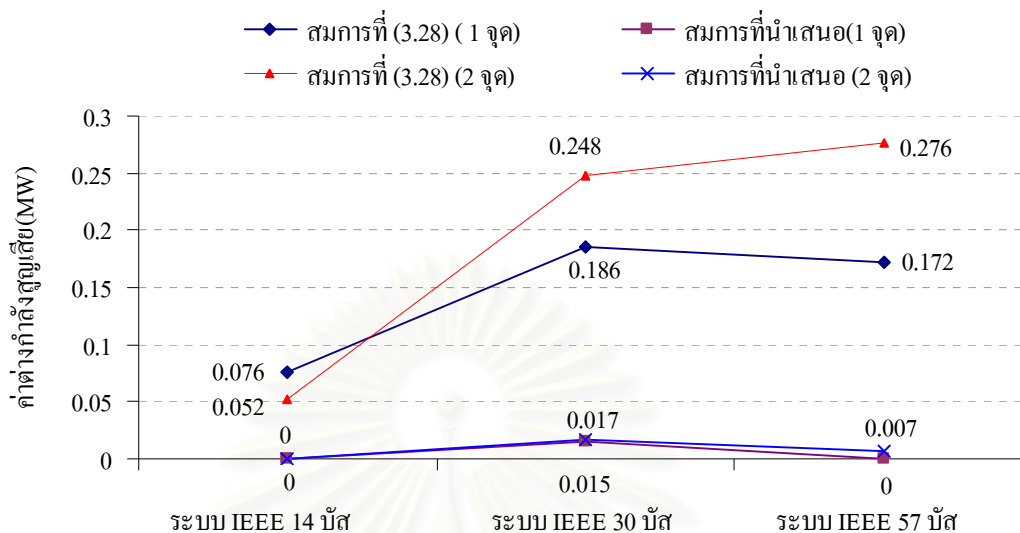
ตารางที่ 5.9 กำลังสูญเสียและขนาดตัวเก็บประจุหรือ SVC เมื่อติดตั้ง 1 จุด

ระบบทดสอบ IEEE	สมการที่ (3.28)				สมการที่นำเสนอ				ทดสอบติดตั้ง 1 บัส			
	บัส	Bcap (pu.)	α_{svc} (องศา)	กำลังสูญเสีย (MW)	บัส	Bcap (pu.)	α_{svc} (องศา)	กำลังสูญเสีย (MW)	บัส	Bcap (pu.)	α_{svc} (องศา)	กำลังสูญเสีย (MW)
14 บัส	14	0.113	116.6	13.681	9	0.440	125.7	13.605	9	0.440	125.7	13.605
30 บัส	26	0.050	115.1	18.116	10	0.582	130.3	17.945	21	0.246	120.1	17.930
57 บัส	33	0.111	116.5	18.010	38	0.377	123.8	17.838	38	0.377	123.8	17.838

ตารางที่ 5.10 กำลังสูญเสียและขนาดตัวเก็บประจุหรือ SVC เมื่อติดตั้ง 2 จุด

ระบบ ทดสอบ IEEE	สมการที่ (3.28)				สมการที่นำเสนอ				ทดสอบติดตั้ง 2 บัส			
	บัส	Bcap (pu.)	α_{svc} (องศา)	กำลัง สูญเสีย (MW)	บัส	Bcap (pu.)	α_{svc} (องศา)	กำลัง สูญเสีย (MW)	บัส	Bcap (pu.)	α_{svc} (องศา)	กำลัง สูญเสีย (MW)
14 บัส	14	0.094	116.1	13.610	9	0.408	124.7	13.558	9	0.408	124.7	13.558
	10	0.147	117.5		13	0.098	116.2		13	0.098	116.2	
30 บัส	26	0.045	112.8	18.058	10	0.500	127.6	17.827	4	0.494	127.4	17.810
	30	0.050	112.7		24	0.119	116.8		21	0.217	119.3	
57 บัส	33	0.048	112.7	17.931	38	0.287	121.2	17.662	36	0.192	118.7	17.655
	31	0.091	116.1		35	0.123	116.9		13	0.466	126.5	

จากการทดสอบหาลำดับความสำคัญบัสที่จะเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุหรือ SVC ของทั้ง 3 ระบบพบว่าสมการที่นำเสนอสามารถหาตำแหน่งที่เหมาะสมได้ดีกว่าสมการที่ (3.28) เพราะสมการที่นำเสนอได้ตำแหน่งที่ทำให้กำลังสูญเสียลดลงต่ำกว่าทั้ง 3 ระบบ และกรณีติดตั้ง 2 จุดก็ได้ผลดีกว่า ถ้าต้องการติดตั้งเพิ่มมากกว่า 2 จุด ก็ทำในรูปแบบเดียวกัน จากการทดสอบติดตั้ง 1 บัส ของระบบ IEEE 14 บัส, IEEE 30 บัส และ IEEE 57 บัส ตำแหน่งจากสมการที่นำเสนอได้กำลังสูญเสียต่ำกว่าสมการที่ (3.28) เท่ากับ 0.076 MW, 0.171 MW และ 0.172 MW ตามลำดับ และเมื่อติดตั้ง 2 บัส ของระบบ IEEE 14 บัส, IEEE 30 บัส และ IEEE 57 บัส ตำแหน่งจากสมการที่นำเสนอได้กำลังสูญเสียต่ำกว่าสมการที่ (3.28) เท่ากับ 0.052 MW, 0.248 MW และ 0.276 MW ตามลำดับ แสดงผลค่าความต่างกำลังสูญเสียเปรียบเทียบการเลือกติดตั้งครั้งละ 1 บัส และการเลือกติดตั้งครั้งละ 2 บัส ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ค่าความต่างกำลังสูญเสียเทียบกับกรณีทดสอบติดตั้ง

จากรูปกราฟแสดงให้เห็นถึงค่าความต่างกำลังสูญเสียเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุหรือ SVC ซึ่งการติดตั้งตามตำแหน่งที่ได้จากสมการที่นำเสนอมีความต่างของกำลังสูญเสียน้อยกว่าการติดตั้งตามตำแหน่งที่ได้จากสมการที่ (3.28)

5.4.2 ผลการทดสอบหาจุดติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับ TCSC

การติดตั้ง TCSC ระหว่างสายส่งเป็นการเปลี่ยนทิศทางกรไหลของกำลังไฟฟ้าบางส่วน ถ้าเปลี่ยนด้วยค่าที่เหมาะสมก็จะทำให้กำลังสูญเสียลดลงได้ การหาตำแหน่งสายส่งที่เหมาะสมจะพิจารณาตามแนวทางที่ได้เสนอตามสมการที่(3.37) พร้อมเปรียบเทียบผลกับการเลือกสายส่งโดยใช้สมการที่(3.36) และทดสอบติดตั้งทุกสายส่งเขียนเป็นกราฟเพื่อจัดลำดับเปรียบเทียบผลกับสมการที่นำเสนอ พารามิเตอร์ของ TCSC กำหนดให้ X_C มีค่า 0.005 pu. และ X_L มีค่า 0.001 pu. ในขั้นต้นต้องทำการหาค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ที่มีอยู่ในระบบก่อนแล้วจึงจัดลำดับ ผลการคำนวณหาดัชนีตามสมการที่(3.36) และสมการที่(3.37) แสดงดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ดัชนีตำแหน่งติดตั้ง TCSC

ลำดับ	IEEE 14 บัส				IEEE 30 บัส				IEEE 57 บัส			
	สมการที่ (3.36)		สมการที่นำเสนอ		สมการที่ (3.36)		สมการที่นำเสนอ		สมการที่ (3.36)		สมการที่นำเสนอ	
	สาย	ดัชนี	สาย	ดัชนี	สาย	ดัชนี	สาย	ดัชนี	สาย	ดัชนี	สาย	ดัชนี
1	1	1.3501	1	0.2254	1	1.7468	1	0.3563	8	0.6604	15	0.0395
2	7	0.2378	3	0.0283	4	0.3713	5	0.0452	15	0.4341	8	0.0297
3	3	0.2299	2	0.0273	5	0.2966	2	0.0355	3	0.3812	18	0.0160
4	7	0.2231	4	0.0213	2	0.2928	6	0.0331	28	0.2505	3	0.0145
5	4	0.1757	7	0.0154	7	0.2728	4	0.0230	18	0.2466	17	0.0137

จากค่าดัชนีของทั้งสามระบบการติดตั้ง 1 จุด จะเลือกสายส่งที่มีค่าดัชนีเป็นลำดับที่ 1 และเมื่อต้องการติดตั้ง 2 จุดก็เลือกสายส่งที่มีค่าดัชนีรองลงมา ค่าปรับตั้งและกำลังสูญเสียแสดงในตารางที่ 5.12 และการทดสอบติดตั้ง 2 จุด แสดงในตารางที่ 5.13

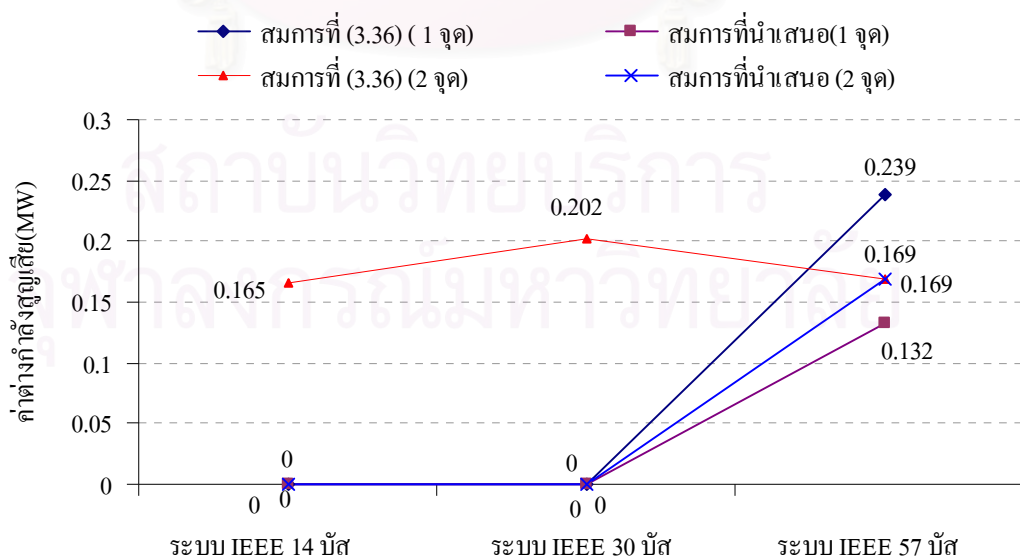
ตารางที่ 5.12 กำลังสูญเสียและขนาดของ TCSC เมื่อติดตั้ง 1 จุด

ระบบทดสอบ IEEE	สมการที่ (3.36)				สมการที่นำเสนอ				ทดสอบติดตั้ง 1 สายส่ง			
	สายส่ง	X _{tcsc} (pu.)	α_{tcsc} (องศา)	กำลังสูญเสีย (MW)	สายส่ง	X _{tcsc} (pu.)	α_{tcsc} (องศา)	กำลังสูญเสีย (MW)	สายส่ง	X _{tcsc} (pu.)	α_{tcsc} (องศา)	กำลังสูญเสีย (MW)
14 บัส	1	0.035	131.1	13.624	1	0.035	131.1	13.624	1	0.035	131.1	13.624
30 บัส	1	0.025	130.2	18.075	1	0.025	130.2	18.075	1	0.025	130.2	18.075
57 บัส	8	0.004	116.6	18.343	15	-0.023	137.4	18.236	2	0.051	131.8	18.104

ตารางที่ 5.13 กำลังสูญเสียและขนาดของ TCSC เมื่อติดตั้ง 2 จุด

ระบบ ทดสอบ IEEE	สมการที่ (3.36)				สมการที่นำเสนอ				ทดสอบติดตั้ง 2 สายส่ง			
	สาย ส่ง	X _{tcsc} (pu.)	α_{tcsc} (องศา)	กำลัง สูญเสีย (MW)	สาย ส่ง	X _{tcsc} (pu.)	α_{tcsc} (องศา)	กำลัง สูญเสีย (MW)	สาย ส่ง	X _{tcsc} (pu.)	α_{tcsc} (องศา)	กำลัง สูญเสีย (MW)
14 บัส	1	0.039	130.3	13.599	1	0.041	131.4	13.434	1	0.041	131.4	13.434
	7	0.022	129.7		3	-0.066	134.7		3	-0.066	134.7	
30 บัส	1	0.023	129.9	18.063	1	0.032	130.8	17.861	1	0.032	130.8	17.861
	4	-0.005	179.9		5	-0.062	134.8		5	-0.062	134.8	
57 บัส	8	0.003	112.1	18.234	15	-0.023	137.4	18.234	2	0.051	131.8	18.065
	15	-0.023	137.4		8	0.003	112.1		4	0.079	132.3	

จากการทดสอบหาลำดับความสำคัญสายส่งที่จะเลือกติดตั้ง TCSC ของทั้ง 3 ระบบพบว่าสมการที่นำเสนอสามารถหาคำแนะนำที่เหมาะสมได้ดีกว่าสมการที่ (3.36) เพราะสมการที่นำเสนอได้คำแนะนําที่ทำให้กำลังสูญเสียลดลงต่ำกว่าหรือเท่ากับทั้ง 3 ระบบ การทดสอบเทียบค่าความต่างของกำลังสูญเสียกับกรณีที่จัดลำดับโดยการทดสอบติดตั้งครั้งละ 1 สายส่งและติดตั้งครั้งละ 2 สายส่ง แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ค่าความต่างกำลังสูญเสียเทียบกับกรณีที่จัดลำดับโดยการทดสอบติดตั้งโดยตรง

จากการทดสอบติดตั้ง TCSC จำนวน 1 ตัว ของระบบ IEEE 14 บัส และ IEEE 30 บัส ได้ตำแหน่งเดียวกัน สำหรับระบบ IEEE 57 บัส ตำแหน่งจากสมการที่นำเสนอได้กำลังสูญเสียต่ำกว่าสมการที่ (3.36) เท่ากับ 0.107 MW กรณีติดตั้ง TCSC จำนวน 2 ตัว ระบบ IEEE 14 บัส และ IEEE 30 บัส ตำแหน่งจากสมการที่นำเสนอได้กำลังสูญเสียต่ำกว่าสมการที่ (3.36) เท่ากับ 0.165 MW และ 0.202 MW ตามลำดับ ส่วนระบบ IEEE 57 ได้ค่าเท่ากัน จากรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นถึงความต่างกำลังสูญเสียเมื่อติดตั้ง TCSC ซึ่งการติดตั้งตามตำแหน่งที่ได้จากสมการที่นำเสนอมีความต่างของกำลังสูญเสียน้อยกว่าการติดตั้งตามตำแหน่งที่ได้จากสมการที่ (3.36)

5.4.3 ผลการทดสอบหาจุดติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับ UPFC

UPFC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าและควบคุมแรงดันที่บัส การหาจุดติดตั้งอาจพิจารณาจากความจำเป็นในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ หรือถ้าต้องการดูตามการลดลงของกำลังสูญเสียก็ต้องเทียบว่าที่สายและบัสใดติดตั้งแล้วกำลังสูญเสียนี้อัตราการลดลงมากที่สุด

ตารางที่ 5.14 ดัชนีตำแหน่งติดตั้ง UPFC

ลำดับ	IEEE 14 บัส			IEEE 30 บัส			IEEE 57 บัส		
	บัส	สาย	ดัชนี	บัส	สาย	ดัชนี	บัส	สาย	ดัชนี
1	4	4	0.0954	6	6	0.0121	14	28	0.0137
2	4	7	0.0120	6	7	0.0058	13	14	0.0088
3	5	2	0.0090	5	5	0.0014	15	15	0.0070
4	3	3	0.0055	6	9	0.0012	38	57	0.0063

ตารางที่ 5.15 กำลังสูญเสียเมื่อติดตั้ง UPFC 1 จุด

กรณีทดสอบ	IEEE 14 บัส			IEEE 30 บัส			IEEE 57 บัส		
	บัส	สาย	กำลังสูญเสีย (MW)	บัส	สาย	กำลังสูญเสีย (MW)	บัส	สาย	กำลังสูญเสีย (MW)
ติดตั้งตามดัชนี	4	4	13.536	6	6	17.856	14	28	17.878
ทดสอบติดตั้ง	1	1	13.306	1	1	17.518	36	49	17.693

จากผลการทดสอบการติดตั้ง UPFC ได้ตำแหน่งที่กัมมันต์สูญเสียมีค่าห่างจากตำแหน่งที่ทำให้กัมมันต์สูญเสียลดลงต่ำที่สุดเพราะ UPFC มีผลทำให้กัมมันต์ไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายเปลี่ยนแปลงด้วย แต่การติดตั้ง UPFC มีเป้าหมายหลักเพื่อการควบคุมกัมมันต์ไฟฟ้างั้นการหาตำแหน่งโดยเทียบกับกัมมันต์สูญเสียจึงถูกนำมาพิจารณาน้อย

สมการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมเป็นเพียงสมการที่จะนำมาช่วยประกอบการพิจารณาเพราะบางกรณีตัวเลขของลำดับมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าที่ทำให้กัมมันต์สูญเสียลดลงมากที่สุดอาจจะไม่ใช่ค่าตัวเลขแรกเสมอไป แต่ก็ยังเป็นกลุ่มตำแหน่งที่จะทำให้กัมมันต์สูญเสียลดลงมาก

5.5 การทดสอบปรับตั้งอุปกรณ์ตามช่วงเวลา

การทดสอบแบ่งเป็นสองหัวข้อหลักคือกรณีที่ใช้ค่าปรับตั้งเดิมตลอดเวลาและกรณีที่ต้องการเปลี่ยนค่าปรับตั้งใหม่ตามตำแหน่งเวลา ในกรณีที่สองจะต้องพิจารณาถึงจำนวนครั้งที่ปรับ จำนวนอุปกรณ์ที่จะปรับ และลำดับการปรับตั้ง ในการทดสอบจะเปรียบเทียบค่ากัมมันต์สูญเสีย โดยการให้พลังงานไฟฟ้าในหนึ่งวันตามรูปที่ 4.1 ใช้ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14, 30 และ 57 บัส ติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมตามหัวข้อการทดสอบหาตามตำแหน่งกรณี 2 จุด โดยให้โหลดทุกบัสเปลี่ยนตามเวลาและเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วนที่เท่ากันทุกบัส โดยในแต่ละช่วงเวลาค่าตัวคูณตามตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ตัวคูณโหลดตามช่วงเวลา

ชั่วโมงที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
ตัวคูณ	0.7531	0.7284	0.7099	0.6852	0.6667	0.679	0.7284	0.716
ชั่วโมงที่	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
ตัวคูณ	0.8148	0.9259	0.9753	0.9877	0.9259	0.9568	1	0.9877
ชั่วโมงที่	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
ตัวคูณ	0.963	0.9074	0.858	0.963	0.9506	0.9383	0.9136	0.8889

5.5.1 การทดสอบหาค่าปรับตั้งคงที่ตลอดช่วงเวลา

ในการทดสอบจะสมมติให้โหลดทุกบัสเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมง การหาค่าปรับตั้งจะใช้สมการที่ (4.2)-(4.4) ประกอบ ผลการทดสอบจะแบ่งค่าปรับตั้งเป็น 6 กรณีคือ

กรณีที่ 1 ใช้ค่าปรับตั้งที่คิดจากโหลดทุกช่วงเวลา

กรณีที่ 2 ใช้ค่าปรับตั้งที่โหลดสูงสุด

กรณีที่ 3 ใช้ค่าปรับตั้งที่โหลดสูงสุดกับโหลดต่ำสุด

กรณีที่ 4 ใช้ค่าปรับตั้งที่โหลดสูงสุดกับโหลดที่ใกล้ค่าเฉลี่ยโหลดทั้งหมด

กรณีที่ 5 ใช้ค่าปรับตั้งที่โหลดสูงสุดกับโหลดที่ใกล้ค่าเฉลี่ยโหลดตั้งแต่เวลา

0.00-7.00 น.

กรณีที่ 6 ใช้ค่าปรับตั้งที่โหลดที่ใกล้ค่าเฉลี่ยโหลด ตั้งแต่เวลา 0.00-7.00 น. กับ

โหลดที่ใกล้ค่าเฉลี่ยโหลดตั้งแต่เวลา 9.00-23.00 น.

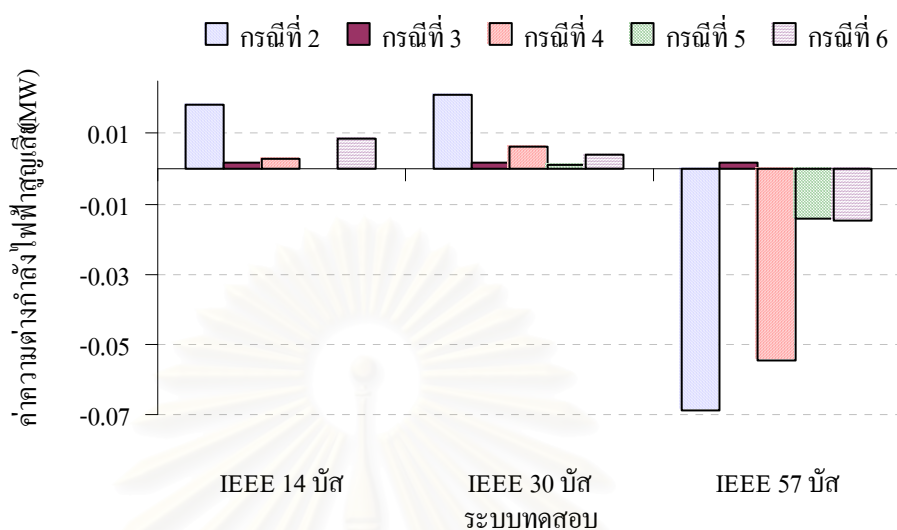
ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 กำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันเมื่อใช้ค่าปรับตั้งที่ต่างกัน

ระบบ ทดสอบ	กำลังสูญเสียเฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง (MW)					
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6
IEEE 14 บัส	9.5792	9.5976	9.5810	9.5821	9.5789	9.5879
IEEE 30 บัส	12.6795	12.7003	12.6814	12.6855	12.6808	12.6834
IEEE 57 บัส	13.3323	13.2637	13.3339	13.2779	13.3179	13.3177

ตารางที่ 5.18 จำนวนครั้งที่แรงดันเกินพิกัด(รวมทุกบัส)

ระบบ ทดสอบ	จำนวนแรงดันที่เกิน 1.05 pu. ใน 1 วัน (ค่าแรงดันสูงสุด)					
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6
IEEE 14 บัส	0	16(1.06)	0	10(1.057)	3(1.052)	3(1.052)
IEEE 30 บัส	0	0	0	0	0	0
IEEE 57 บัส	0	359(1.098)	0	123(1.082)	21(1.052)	19(1.057)



รูปที่ 5.11 ค่าความต่างของกำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันที่เทียบกับกรณีที่ 1

จากการทดสอบทั้ง 6 กรณี สรุปได้ว่ากรณีที่ 1 เป็นกรณีที่เหมาะสมในด้านกำลังสูญเสียและแรงดันแต่ระบบที่คำนวณจะมีขนาดใหญ่มาก ในกรณีที่ 2 เป็นการตั้งค่าปรับตั้งที่ค่าโหลดสูงสุดทำให้กำลังสูญเสียมากและมีแรงดันเกินพิกัดจำนวนมาก กรณีที่ 3 เป็นกรณีที่เหมาะสมที่สุดเมื่อไม่ต้องการให้มีแรงดันเกินพิกัดโดยที่ระบบทดสอบเพิ่มขนาด 2 เท่า ส่วนกรณีที่ 4 และ 5 กำลังสูญเสียน้อยและมีแรงดันเกินในช่วงเวลาสั้นๆ แต่ก็มีขนาดของแรงดันที่เกินไม่สูงมากอาจจะพอยอมรับได้

สรุปได้ว่าการตั้งค่าปรับตั้งคงที่ตลอดช่วงเวลาดำเนินการค่าเฉลี่ยโหลดมาพิจารณา ร่วมกับโหลดเต็มพิกัดก็จะทำให้กำลังสูญเสียลดลง และถ้าไม่ต้องการให้มีแรงดันอยู่นอกขีดจำกัดก็ต้องใช้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของโหลดในการหาค่าปรับตั้ง

5.5.2 การทดสอบการปรับตั้งอุปกรณ์ตามช่วงเวลา

การทดสอบจะแบ่งเป็น 7 กรณี ถ้ากรณีที่ใช้ค่าคงที่ตลอดช่วงให้ใช้การหาค่าปรับตั้งตามหลักการของกรณีที่ 3 ของหัวข้อที่ผ่านมา โดยโหลดเต็มพิกัดก็จะหมายถึงโหลดที่สูงสุดในช่วงเวลาที่จะใช้ค่าปรับตั้งเดียวกัน กรณีทดสอบมีดังนี้

กรณีที่ 1 ปรับตั้งทุกชั่วโมง

กรณีที่ 2 แบ่งการปรับเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เวลา 0.00-8.00 น.

ช่วงที่ 2 เวลา 9.00-23.00 น.

กรณีที่ 3 แบ่งการปรับเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เวลา 0.00-7.00 น.

ช่วงที่ 2 เวลา 7.30-8.30 น.

ช่วงที่ 3 เวลา 9.00-23.00 น.

กรณีที่ 4 เหมือนกรณีที่ 2 แต่ปรับเฉพาะแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์อื่นใช้ค่าปรับตั้งคงที่ตามกรณีที่ 3 หัวข้อ 5.5.1

กรณีที่ 5 เหมือนกรณีที่ 2 แต่ปรับเฉพาะแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์อื่นใช้ค่าปรับตั้งคงที่ตามกรณีที่ 5 หัวข้อ 5.5.1

กรณีที่ 6 เหมือนกรณีที่ 2 แต่ปรับเฉพาะแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์อื่นใช้ค่าปรับตั้งคงที่ตามกรณีที่ 6 หัวข้อ 5.5.1

กรณีที่ 7 เหมือนกรณีที่ 2 แต่ปรับเฉพาะแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์อื่นใช้ค่าปรับตั้งคงที่ตามกรณีที่ 2 หัวข้อ 5.5.1

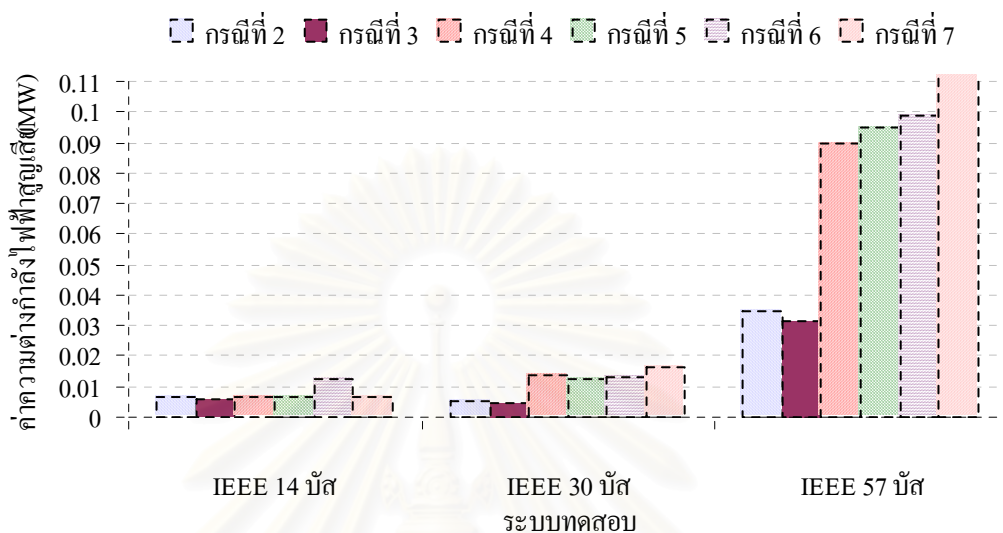
ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 กำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันเมื่อใช้ค่าปรับตั้งที่ต่างกัน

กรณีที่	กำลังสูญเสียเฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง (MW)						
	1	2	3	4	5	6	7
IEEE 14 บัส	9.5598	9.5666	9.5664	9.5739	9.5743	9.5799	9.5742
IEEE 30 บัส	12.6623	12.6675	12.6670	12.6758	12.6748	12.6757	12.6784
IEEE 57 บัส	13.2230	13.2576	13.2546	13.3126	13.3179	13.3216	13.8379

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับทุกชั่วโมงจะทำให้กำลังสูญเสียลดลงมากที่สุด แต่ทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงทดสอบปรับตั้งเป็นกรณีต่างๆ กรณีที่ 2 ปรับ 2 ช่วงเวลา กำลังสูญเสียห่างจากกรณีแรกน้อย แต่การปรับตั้งยังคงใช้จำนวนอุปกรณ์มาก ในกรณีที่ 3 ก็เช่นเดียวกันใช้จำนวนอุปกรณ์มาก กรณีที่ 4 และ 5 เป็นทางเลือกที่ดีเพราะปรับเฉพาะแรงดันในช่วงการเปลี่ยนแปลงของโหลดเร็ว ส่วนอุปกรณ์อื่นๆ คงที่ ในกรณีที่ 7 เป็นการปรับตั้งกรณีที่โหลดเต็มพิกัดจะเห็นว่าไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นค่าปรับตั้งสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการให้คงที่ตลอดช่วงเวลา เหตุผลที่ทดสอบโดยการปรับเฉพาะแรงดันเพราะว่าเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้

ต่อเนื่องเมื่อเทียบกับแท่งหม้อแปลงและตัวเก็บประจุที่ต้องปรับเป็นขั้นซึ่งไม่ควรมีการปรับบ่อยครั้งเพราะจะทำให้อายุการใช้งานสั้น



รูปที่ 5.12 ค่าความต่างของกำลังสูญเสียเฉลี่ยต่อวันเทียบกับกรณีที่ 1

สรุปได้ว่าการปรับตั้งอุปกรณ์ตามช่วงเวลาจะทำให้กำลังสูญเสียลดลงได้ และไม่มีกรณีที่แรงดันอยู่นอกขีดจำกัด แต่ควรเลือกช่วงปรับตั้งให้เหมาะสม กรณีที่ 4 และ 5 น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด แต่ก็ต้องขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา

5.5.3 ผลการทดสอบเลือกอุปกรณ์ที่จะปรับตั้ง

เมื่อต้องการปรับตั้งอุปกรณ์ตามช่วงเวลาควรที่จะเลือกอุปกรณ์ที่ให้ผลต่อการลดกำลังสูญเสียมากที่สุด โดยการทดสอบจะเลือกการปรับตั้งในรูปแบบต่างๆ เพื่อพิจารณาว่าสมการที่ (4.5) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง ใช้ค่าปรับตั้งกรณีที่ 4 ของหัวข้อ 5.5.2 กำหนดให้ช่วงเวลา 0.00 – 8.00 น. ใช้ค่าเดิม แล้วเลือกปรับอุปกรณ์ชนิดละ 1 ตัวในช่วงเวลา 9.00-23.00 น.

ตารางที่ 5.20 กำลังสูญเสียเมื่อเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ชนิดละ 1 ตัว ของระบบ IEEE 14 บัส

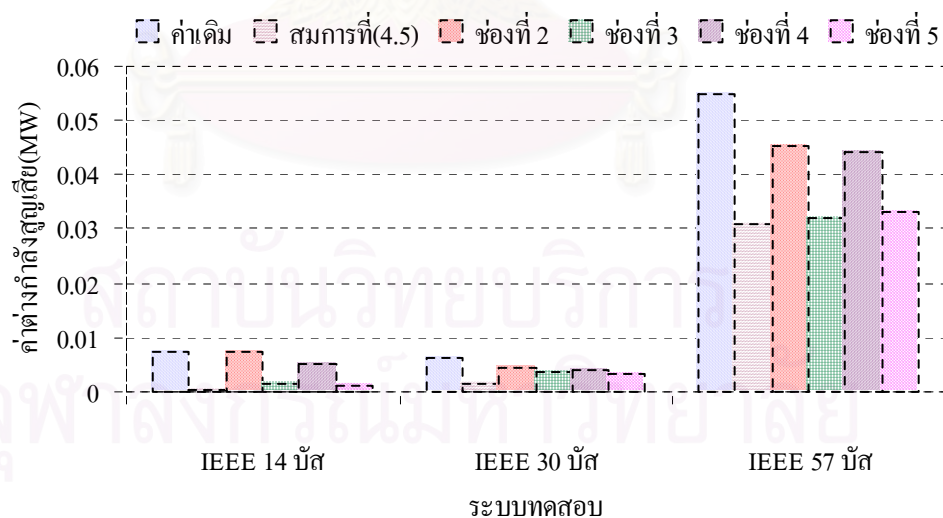
อุปกรณ์	ค่าปรับตั้งช่วงเวลา 9.00-23.00 น.			ค่าปรับตั้งใหม่ช่วงเวลา 9.00-23.00 น.				
	ค่าต่าง	ค่าเดิม	ปรับทุก ตัว	อุปกรณ์ที่เลือกปรับ				
				(1) T10, C9,X3	(2) T8, C13,X1	(3) T9, C9,X3	(4) T10, C13,X1	(5) T8, C9,X3
หม้อแปลง (T8)	0.003	0.997	0.994	---	1.003	---	---	0.994
หม้อแปลง (T9)	0.005	0.999	1.004	---	---	0.997	---	---
หม้อแปลง (T10)	0.005	1.002	0.997	0.997	---	---	0.994	---
SVC (C9)	0.052	0.244	0.296	0.301	---	0.305	---	0.305
SVC (C13)	0.009	0.082	0.091	---	0.095	---	0.099	---
TCSC (X1)	0	0.045	0.045	---	0.044	---	0.045	---
TCSC (X3)	0.001	-0.063	-0.064	-0.064	---	-0.064	---	-0.064
กำลังสูญเสียเฉลี่ย (MW)	9.5739	9.5666	9.5670	9.5670	9.5738	9.5681	9.5718	9.56780

ตารางที่ 5.21 กำลังสูญเสียเมื่อเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ชนิดละ 1 ตัว ของระบบ IEEE 30 บัส

อุปกรณ์	ค่าปรับตั้งช่วงเวลา 9.00-23.00 น.			ค่าปรับตั้งใหม่ช่วงเวลา 9.00-23.00 น.				
	ค่าต่าง	ค่าเดิม	ปรับทุก ตัว	อุปกรณ์ที่เลือกปรับ				
				(1) T11, C10,X5	(2) T36, C24,X1	(3) T12, C10,X5	(4) T11, C24,X1	(5) T36, C10,X5
หม้อแปลง (T11)	0.009	0.976	0.967	0.963	---	---	0.974	---
หม้อแปลง (T12)	0.006	0.984	0.978	---	---	0.965	---	---
หม้อแปลง (T15)	0.003	1.011	1.008	---	---	---	---	---
หม้อแปลง (T36)	0.002	1.029	1.031	---	1.031	---	---	1.035
SVC (C10)	0.048	0.285	0.333	0.342	---	0.345	---	0.326
SVC (C24)	0.012	0.099	0.111	---	0.116	---	0.116	---
TCSC (X1)	0	0.034	0.034	---	0.034	---	0.034	---
TCSC (X5)	0.002	-0.056	-0.058	-0.058	---	-0.058	---	-0.058
กำลังสูญเสียเฉลี่ย (MW)	12.6758	12.6695	12.6708	12.6740	12.6730	12.6737	12.6727	

ตารางที่ 5.22 กำลังสูญเสียเมื่อเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ชนิดละ 1 ตัว ของระบบ IEEE 57 บัส

อุปกรณ์	ค่าปรับตั้งช่วงเวลา 9.00-23.00 น.			ค่าปรับตั้งใหม่ช่วงเวลา 9.00-23.00 น.				
	ค่าต่าง	ค่าเดิม	ปรับทุก ตัว	อุปกรณ์ที่เลือกปรับ				
				(1) T54, C38,X15	(2) T31, C35,X8	(3) T66, C38,X15	(4) T54, C35,X8	(5) T31, C38,X15
หม้อแปลง (T31)	0.001	0.999	1	---	0.995	---	---	0.995
หม้อแปลง (T54)	0.018	1.041	1.061	1.061	---	---	1.058	---
หม้อแปลง (T58)	0.004	1.003	1.007	---	---	---	---	---
หม้อแปลง (T66)	0.009	1.037	1.046	---	---	1.042	---	---
SVC (C35)	0.013	0.098	0.111	---	0.127	---	0.125	---
SVC (C38)	0.034	0.209	0.243	0.291	---	0.289	---	0.293
TCSC (X8)	0	0.004	0.004	---	0.004	---	0.004	---
TCSC (X15)	0	-0.021	-0.021	-0.02	---	-0.02	---	-0.02
กำลังสูญเสียเฉลี่ย (MW)	13.3126	13.2576	13.2886	13.3028	13.2898	13.3016	13.2907	



รูปที่ 5.13 ผลต่างกำลังสูญเสียเมื่อเทียบกับกรณีที่ปรับตั้งทุกตัว

จากตารางที่ 5.20-5.22 แสดงถึงการเลือกอุปกรณ์ที่จะปรับตั้ง โดยที่ช่องที่(1) เลือกตามสมการที่ (4.5) ได้กำลังสูญเสียที่ลดลงมากที่สุด ช่องที่(2) เป็นการเลือกตัวที่มีการเปลี่ยนแปลง

น้อยซึ่งผลที่ได้ทำให้กำลังสูญเสียมีค่ามากที่สุด ช่องที่(3) ถึงช่องที่(5) เลือกในรูปแบบที่แตกต่างกัน กำลังสูญเสียมากกว่าช่องที่(1) จึงสรุปได้ว่าสมการที่(4.5) ใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกอุปกรณ์ที่จะปรับตั้งชนิดละ 1 ตัว เพื่อให้กำลังสูญเสียลดลงมากที่สุด และรูปที่ 5.13 แสดงถึงผลต่างของกำลังสูญเสียเมื่อเทียบกับกรณีที่ปรับตั้งทุกตัว อธิบายได้ว่าค่าปรับตั้งใหม่ที่มีค่าห่างจากค่าปรับตั้งเดิมมากจะส่งผลต่อการลดลงของกำลังสูญเสียมากเช่นกัน

5.5.4 ผลทดสอบการจัดลำดับการปรับตั้งอุปกรณ์

การจัดลำดับการปรับตั้งอุปกรณ์มีจุดมุ่งหมายเพื่อดูผลของแรงดันระหว่างการปรับตั้งอุปกรณ์ โดยเลือกตัวแปรที่จะปรับตั้ง 4 ชนิด คือแรงดันที่บัสควบคุม, แท็ปหม้อแปลง, TCSC และ ตัวเก็บประจุ(หรือ SVC) โดยสลับลำดับการปรับตั้งค่าของอุปกรณ์แต่ละชนิดเพื่อดูผลของแรงดันในขณะที่ปรับตั้งอุปกรณ์ โดยเลือกอุปกรณ์ตามสมการที่(4.5) ที่แสดงในหัวข้อ 5.5.3 การเปลี่ยนค่าปรับตั้งของอุปกรณ์จะพิจารณากรณีที่โหลดเพิ่มและกรณีที่โหลดลดลง กำหนดให้อักษร V หมายถึงปรับแรงดัน อักษร T หมายถึงปรับแท็ปหม้อแปลง อักษร C หมายถึงปรับตัวเก็บประจุหรือ SVC และอักษร X หมายถึงปรับ TCSC เนื่องจาก TCSC มีค่าปรับเปลี่ยนน้อยจึงเปลี่ยนเป็นตัวสุดท้ายทุกครั้ง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันคำนวณตามสมการที่(4.6) ผลการทดสอบมีดังนี้

กรณีที่โหลดเพิ่ม

การเปลี่ยนค่าปรับตั้งกรณีที่โหลดเพิ่มจะทำในช่วงเวลา 8.00 น.- 9.00 น. ค่าปรับตั้งใหม่จะเปลี่ยนเวลา 9.00 น. ค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันแสดงในตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 ค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน

ลำดับ	ค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน					
	V-T-C-X	V-C-T-X	T-V-C-X	T-C-V-X	C-V-T-X	C-T-V-X
IEEE 14 บัส	0.001254	0.001278	0.001347	0.00134	0.001136	0.0011
IEEE 30 บัส	0.001275	0.001194	0.001381	0.001228	0.001235	0.001157
IEEE 57 บัส	0.003319	0.003433	0.003745	0.003748	0.003471	0.003357

ผลการปรับตั้งจะสังเกตได้ว่าการปรับตั้งแรงดันหรือตัวเก็บประจุก่อนจะให้ผลดีกว่าการปรับเปลี่ยนค่าแท็ปหม้อแปลงก่อน และเนื่องจากแรงดันในขณะที่เปลี่ยนค่าปรับตั้งอยู่ในขอบเขตจึงไม่มีตารางแสดง

กรณีทีโหลลดลง

การเปลี่ยนค่าปรับตั้งกรณีทีโหลลดลงจะทำในช่วงเวลา 23.00 น.- 0.00 น. ค่าปรับตั้งใหม่จะเปลี่ยนเวลา 0.00 น. จำนวนแรงดันที่เกินขณะเปลี่ยนค่าปรับตั้งแสดงในตารางที่ 5.24 ตารางที่ 5.24 จำนวนแรงดันที่เกินขอบเขต

ลำดับ	จำนวนแรงดันที่เกินขอบเขต(แรงดันสูงสุด)					
	V-T-C-X	V-C-T-X	T-V-C-X	T-C-V-X	C-V-T-X	C-T-V-X
IEEE 14 บัส	2(1.0535)	1(1.0531)	2(1.0538)	1(1.0538)	0	0
IEEE 30 บัส	0	0	0	0	0	0
IEEE 57 บัส	3(1.0529)	3(1.0529)	7(1.0533)	9(1.0533)	5(1.0548)	7(1.0548)

ผลการปรับตั้งจะสังเกตได้ว่าแรงดันจะเกินขอบเขตอันเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกตีฟในระบบมีมากเกินไป การปรับตั้งที่เหมาะสมจำเป็นจะต้องมีการปรับตั้งอุปกรณ์บางชนิดในช่วงเวลา 23.00 น. ตารางที่ 5.25 แสดงผลการปรับตั้งใหม่ กำหนดให้อักษรตัวแรกปรับตั้งที่เวลา 23.00 น. หลังจากนั้นปรับตั้งที่เวลา 0.00 น.

ตารางที่ 5.25 จำนวนแรงดันที่เกินขอบเขตเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาปรับตั้ง

ลำดับ	จำนวนแรงดันที่เกินขอบเขต(แรงดันสูงสุด)					
	V-T-C-X	V-C-T-X	T-V-C-X	T-C-V-X	C-V-T-X	C-T-V-X
IEEE 14 บัส	1(1.0535)	0	1(1.0535)	0	0	0
IEEE 30 บัส	0	0	0	0	0	0
IEEE 57 บัส	1(1.0503)	1(1.0505)	1(1.0503)	3(1.0524)	1(1.0505)	3(1.0524)

จากตารางที่ 5.25 การปรับค่าแรงดันในช่วงเวลา 23.00 น. จะช่วยลดจำนวนแรงดันที่เกินได้ และถ้าช่วงเวลากลับมาทำการปรับตัวเก็บประจุก็จะช่วยลดลงด้วยเช่นกัน การปรับแท็ปของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุต่อเนื่องกันจะมีขนาดของแรงดันที่เกินในระดับสูง ค่าแนวการเบี่ยงเบนมาตรฐานตามรูปแบบการปรับตั้งในตารางที่ 5.25 ได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 5.26

ตารางที่ 5.26 ค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน

ลำดับ	ค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน					
	V-T-C-X	V-C-T-X	T-V-C-X	T-C-V-X	C-V-T-X	C-T-V-X
IEEE 14 บัส	0.001314	0.001331	0.001436	0.00145	0.001231	0.00121
IEEE 30 บัส	0.001371	0.001282	0.001493	0.001363	0.001346	0.001227
IEEE 57 บัส	0.003311	0.003956	0.004334	0.004212	0.003512	0.003351

ผลการคำนวณเหมือนกับตารางที่ 5.24 กล่าวคือการปรับตั้งแรงดันหรือตัวเก็บประจุก่อนจะให้ผลดีกว่าการปรับเปลี่ยนค่าแท็ปหม้อแปลงก่อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบที่สัมพันธ์กับกำลังรีแอกตีฟ เพื่อลดกำลังสูญเสีย โดยพิจารณาการเพิ่มค่าเฟื่อของอุปกรณ์ การหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม และกรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงตามเวลา อีกทั้งยังศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าปรับตั้งตามช่วงเวลาทั้งที่ให้ค่าปรับตั้งคงที่และเปลี่ยนค่าปรับตั้งตามช่วงเวลา ในการวิเคราะห์หัวข้อต่างๆที่กล่าวมาสรุปได้ดังนี้

การเพิ่มค่าเฟื่อของอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่กำลังรีแอกตีฟเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวเก็บประจุหรือ SVC และแท็ปหม้อแปลง พบว่าการเพิ่มค่าเฟื่อของอุปกรณ์จะมีผลต่อการลดลงของกำลังสูญเสียซึ่งเป็นเป้าหมายหลัก แต่ถ้าค่าเฟื่อเพิ่มในอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับการเพิ่มของกำลังสูญเสียก็เป็นสิ่งที่ควรนำมาพิจารณาร่วมด้วย เช่นจำนวนชั้นของแท็ปหม้อแปลงที่มีจำนวนชั้นเพิ่มทำให้แท็ปของหม้อแปลงสามารถใช้งานไปในทางขีดจำกัดบนและในทางขีดจำกัดล่างได้หลายชั้นมากขึ้น ในการเลือกค่าตัวคูณประกอบก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้จัดการระบบว่าจะมุ่งไปที่การลดกำลังสูญเสียอย่างเดียวหรือต้องการให้มีการเพิ่มค่าเฟื่อในระบบด้วย ถ้าระบบมีค่าเฟื่อมากอยู่แล้วก็อาจจะหาค่าปรับตั้งที่ทำให้ลดกำลังสูญเสียให้มากที่สุด

การหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับตัวเก็บประจุหรือ SVC และ TCSC ตามสมการที่นำเสนอผลการทดสอบสามารถใช้ค่าดัชนีบอกถึงตำแหน่งที่จะติดตั้งเพื่อให้มีผลต่อการลดลงของกำลังสูญเสียมากที่สุด ผลทดสอบในกรณีติดตั้งอุปกรณ์เพียงจุดเดียวจะได้ตำแหน่งที่ให้ผลการลดลงของกำลังสูญเสียมากที่สุด การทดสอบกรณีติดตั้ง 2 จุด ได้ตำแหน่งที่เหมาะสม มีบางกรณีที่ได้ไม่ตรงตำแหน่งแต่ก็ต่างจากตำแหน่งที่ดีที่สุดน้อยมาก การติดตั้ง SVC หรือ TCSC ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภท FACTS ทำให้สามารถหาค่าปรับตั้งได้ต่อเนื่องและไม่ต้องคำนึงถึงพิกัด

การหาค่าปรับตั้งคงที่ตลอดช่วงเวลาจะทำให้กำลังสูญเสียลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ค่าปรับตั้งที่โหลดสูงสุด ถ้านำค่าเฉลี่ยโหลดมาพิจารณาร่วมกับโหลดเต็มพิกัดก็จะทำให้กำลังสูญเสียลดลง แต่ระบบเสมือนว่ามีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นควรเลือกที่โหลดเต็มพิกัดใช้ร่วมกับค่าเฉลี่ยของโหลดหรือที่โหลดต่ำสุด การใช้ค่าปรับตั้งในกรณีที่โหลดสูงสุดในบางระบบจะทำให้แรงดันอยู่ขีดจำกัดจำนวนมาก เช่นในกรณีระบบ IEEE 57 บัส

การปรับตั้งอุปกรณ์ตามช่วงเวลาจะทำให้กำลังสูญเสียลดลงได้ แต่ควรเลือกช่วงปรับตั้งให้เหมาะสม เพราะไม่จำเป็นต้องปรับทุกช่วงเวลาที่ทำให้กำลังสูญเสียลดลงได้ การหาค่าปรับตั้งแบบนี้เหมาะสำหรับการนำไปควบคุมแบบตามเวลา โดยการรับค่าโหลดที่เวลานั้นและคำนวณหาค่าปรับตั้ง ก็จะทำให้กำลังสูญเสียในระบบลดลงตามที่เป็นจริง การเลือกปรับตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการลดลงของกำลังสูญเสียโดยที่ไม่ต้องปรับอุปกรณ์หลายตัว

การเลือกลำดับอุปกรณ์เพื่อเปลี่ยนค่าปรับตั้งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา เพราะอาจทำให้แรงดันที่บัสในขณะที่มีการเปลี่ยนค่าปรับตั้งอยู่นอกขอบเขต โดยเฉพาะช่วงการเปลี่ยนค่าปรับตั้งขณะโหลดลดลงอาจมีแรงดันอยู่นอกขอบเขต ดังนั้นการเปลี่ยนค่าปรับตั้งจะต้องทำตั้งแต่โหลดยังไม่เปลี่ยนช่วงเวลาที่ต้องมีการปรับตั้ง จากระบบทดสอบ IEEE 14 บัส, IEEE 30 บัส และ IEEE 57 บัส ไม่ควรปรับแก้หม้อแปลงก่อนเพราะแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงมากในการปรับแต่ละครั้ง

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

1. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ค่าปรับตั้งของตัวเก็บประจุและหม้อแปลงเป็นค่าที่ต่อเนื่อง ในการศึกษาและพัฒนาต่อไปควรคำนวณเพื่อให้เป็นระดับขั้นตามพฤติกรรมจริงของอุปกรณ์ เพื่อจะได้ทราบกำลังสูญเสียที่ใกล้กับความเป็นจริงมากที่สุด
2. ใช้ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ของการทำงานและอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่ายในการควบคุมการปรับตั้ง ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ที่ต้องปรับตั้ง ราคาของอุปกรณ์ควบคุม ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ระยะเวลาในการใช้งาน มาช่วยพิจารณาและตัดสินใจในการปรับตั้งค่าหรือติดตั้งอุปกรณ์ใหม่เพื่อให้กำลังสูญเสียที่ลดลง

รายการอ้างอิง

1. Glover, J. D., and Sarma, M. S. Power System Analysis and Design. 3rd Edition. Australia : Brooks/Cole, 2002.
2. Kundur, P. Power System Stability and Control. New York : McGraw-Hill, 1993.
3. Momoh, J. A. Electric Power System Applications of Optimization. New York : Marcel Dekker, 2001.
4. El-Hawary, M. E. Electrical Energy Systems. London : CRC Press, 2000.
5. Stevenson, W. D. Jr. Elements of Power System Analysis. 4th Edition. New York : McGraw-Hill, 1982.
6. Hajagos, L. M., and Danai, B. Laboratory measurement and models of modern loads and their effect on voltage stability studies. IEEE Transactions on Power system 2,3 (May 1998) : 584-591.
7. Chung, T.S., and Li, Y. Z. A Hybrid GA Approach for OPF with Consideration of FACTS devices. IEEE Power Engineering Review (Feb 2001) : 47-50.
8. Ambriz-Perez, H., Acha, E., and Fuerte-Esquivel, C. R. Advanced SVC Models for New-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies. IEEE Transaction On Power system 15,1 (Feb 2000) : 129-136.
9. Zhang, X. P., and Handschin, E. J. Optimal Power Flow control by Converter based FACTS Controllers. IEE AC-DC Power Transmission Conference 485 (Nov 2001) : 250-255.
10. Stagg, G. W., and El-Abiad, A. H. Computer Methods in Power System Analysis. New York : McGraw-Hill, 1968.
11. Wood, A. J., and Wollenberg, B. F. Power Generation, Operation, and control. 2nd Edition. New York : Wiley and Sons, 1996.
12. Akrotirianakis, L., and Rustem, B. A globally Convergent Interior Point Algorithm for Non-Linear Programming Problems. Technical Report of Department Of Computing Imperial College 97-14 (April 2001) : 1-34.
13. Vargas, L. S., Quintana, V. H., and Vannelli, A. A Tutorial Description of Interior Point Method and its Application to Security-Constrained Economic Dispatch. IEEE Transaction On Power system 8 (August 1993) : 1315-1324.

14. Yan, X., and Guintana, V. H. An Efficient Predictor-Corrector Interior Point Algorithm for Security- Constrained Economic Dispatch. IEEE Transaction On Power system 12,2 (May 1997) : 803-810.
15. Nash, S. G., and Sofer, A. Linear and Nonlinear Programming. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc, 1996.
16. Belhadj, C., Mohamedi, R., and Lefebvre, S. Voltage Stability Moelling and Real-Time Monitoring Using Expert System for Operation Assistance. IEEE Transection On Power system 11,2 (May 1996) : 1037-1043.
17. Nanda, J., Kothari, D. P., and Srivastava, S. C. New Optimal Power-dispatch algorithm using Fletcher's quadratic programming method. IEE 136,3 (May 1989) : 153-161.
18. Bala, J. L. Jr., Kuntz, P. A., and Pebles, M. J. Optimal Capacitor Allocation Using A Distribution-Analyzer- Recorder. IEEE Transection On Power Delivery 12,1 (Jan.1996) : 464-469.
19. Sharif, S. S., and Taylor, J. H. Real-Time Implementation of Optimal Reactive Power Flow. Proceeding of the American Control Conference 16 (June 1999) : 4203-4207.
20. Pai, M. A. Coputer Techniques in Power System Analysis. New Delhi : The McGraw-Hil, 1979.
21. Zimmerman, R. D., and Gan, D. MATPOWER User Manual V.2.0. Power Systems Engineering Research Center(PSERC) School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, Ithacal, 1997.



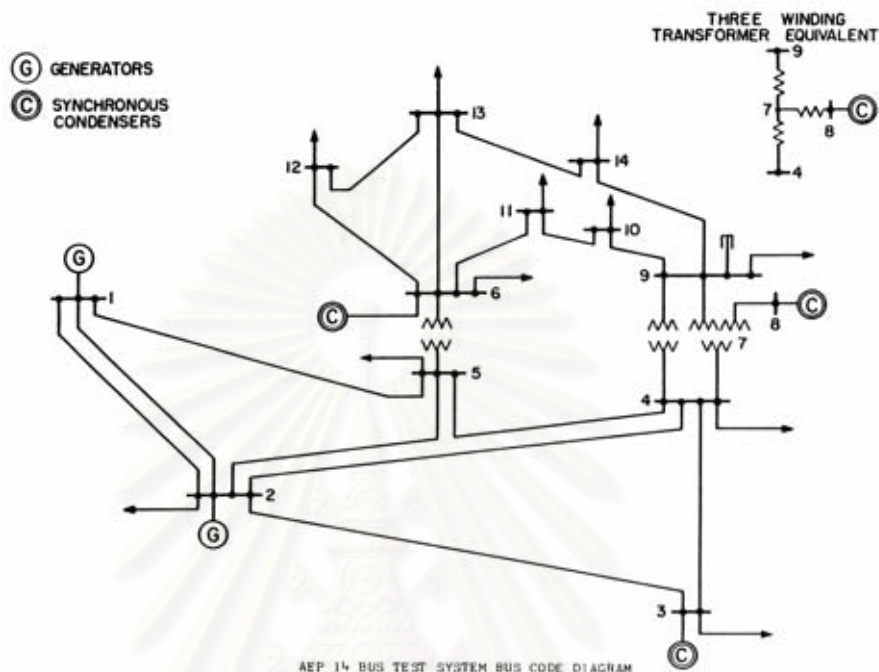
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ก.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B pu.
			P(Mw)	Q(Mvar)	Qmin	Qmax	P(Mw)	Q(Mvar)	
1	0	1.06	xx	xx	-40	50	0	0	0
2	2	1.045	40	xx	-40	50	21.7	12.7	0
3	2	1.01	-	xx	-40	50	94.2	19	0
4	1	-	-	-	-	-	47.8	3.9	0
5	1	-	-	-	-	-	7.6	1.6	0
6	2	1.07	-	xx	-6	24	11.2	7.5	0
7	1	-	-	-	-	-	0	0	0
8	2	1.09	-	xx	-6	24	0	0	0
9	1	-	-	-	-	-	29.5	16.6	0
10	1	-	-	-	-	-	9	5.8	0

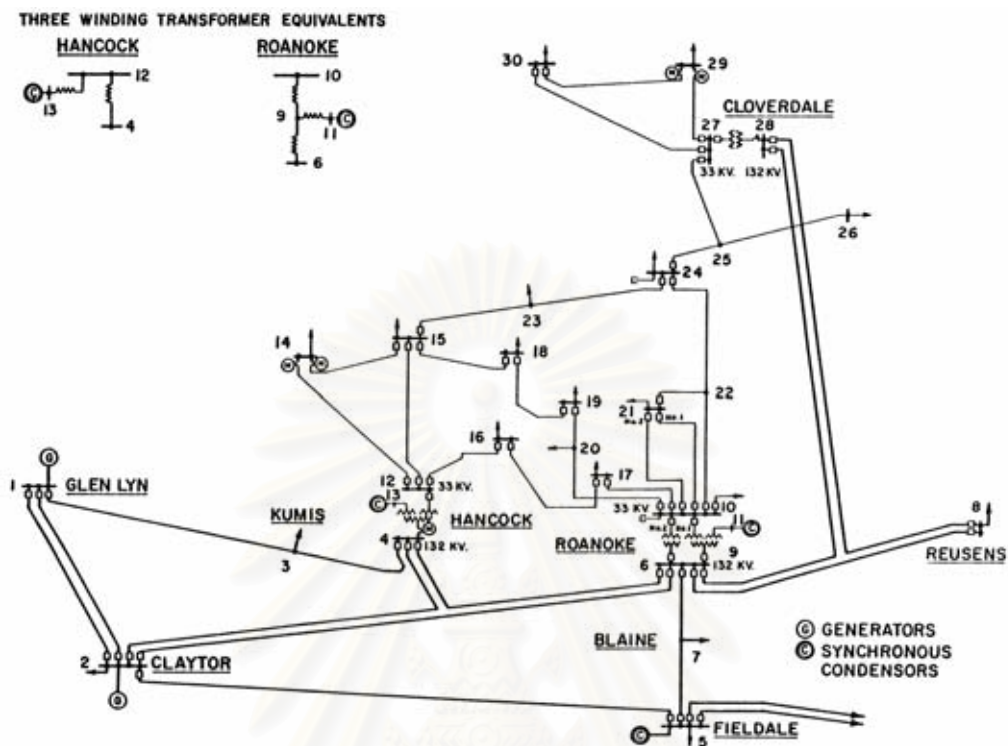
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส(ต่อ)

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B pu.
			P(Mw)	Q(Mvar)	Qmin	Qmax	P(Mw)	Q(Mvar)	
11	1	-	-	-	-	-	3.5	1.8	0
12	1	-	-	-	-	-	6.1	1.6	0
13	1	-	-	-	-	-	13.5	5.8	0
14	1	-	-	-	-	-	14.9	5	0

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

Line No.	From	To	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Tap	Limit (Mva)
1	1	2	0.0194	0.0592	0.0264	-	340
2	1	5	0.0540	0.2230	0.0246	-	170
3	2	3	0.0470	0.1980	0.0219	-	170
4	2	4	0.0581	0.1763	0.0170	-	170
5	2	5	0.0570	0.1739	0.0173	-	170
6	3	4	0.0670	0.1710	0.0064	-	170
7	4	5	0.0134	0.0421	0	-	170
8	4	7	0	0.2091	0	0.9780	65
9	4	9	0	0.5562	0	0.9690	65
10	5	6	0	0.2520	0	0.9320	65
11	6	11	0.0950	0.1989	0	-	50
12	6	12	0.1229	0.2558	0	-	50
13	6	13	0.0662	0.1303	0	-	50
14	7	8	0	0.1762	0	-	50
15	7	9	0	0.1100	0	-	50
16	9	10	0.0318	0.0845	0	-	50
17	9	14	0.1271	0.2704	0	-	50
18	11	10	0.0820	0.1921	0	-	50
19	12	13	0.2209	0.1999	0	-	50
20	13	14	0.1709	0.3480	0	-	50

ก.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B pu.
			P(Mw)	Q(Mvar)	Qmin	Qmax	P(Mw)	Q(Mvar)	
1	0	1.05	xx	xx	-90	100	0	0	0
2	2	1.043	40	xx	-40	50	21.7	12.7	0
3	1	-	-	-	-	-	2.4	1.2	0
4	1	-	-	-	-	-	7.6	1.6	0
5	2	1.01	-	xx	-40	40	94.2	19	0
6	1	-	-	-	-	-	0	0	0
7	1	-	-	-	-	-	22.8	10.9	0
8	2	1.01	-	Xx	-10	40	30	30	0
9	1	-	-	-	-	-	0	0	0
10	1	-	-	-	-	-	5.8	2	19
11	2	1.08	-	Xx	-6	24	0	0	0

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส(ต่อ)

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B pu.
			P(Mw)	Q(Mvar)	Qmin	Qmax	P(Mw)	Q(Mvar)	
12	1	-	-	-	-	-	11.2	7.5	0
13	2	1.07	-	xx	-6	24	0	0	0
14	1	-	-	-	-	-	6.2	1.6	0
15	1	-	-	-	-	-	8.2	2.5	0
16	1	-	-	-	-	-	3.5	1.8	0
17	1	-	-	-	-	-	9	5.8	0
18	1	-	-	-	-	-	3.2	0.9	0
19	1	-	-	-	-	-	9.5	3.4	0
20	1	-	-	-	-	-	2.2	0.7	0
21	1	-	-	-	-	-	17.5	11.2	0
22	1	-	-	-	-	-	0	0	0
23	1	-	-	-	-	-	3.2	1.6	0
24	1	-	-	-	-	-	8.7	6.7	4.3
25	1	-	-	-	-	-	0	0	0
26	1	-	-	-	-	-	3.5	2.3	0
27	1	-	-	-	-	-	0	0	0
28	1	-	-	-	-	-	0	0	0
29	1	-	-	-	-	-	2.4	0.9	0
30	1	-	-	-	-	-	10.6	1.9	0

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Line No.	From	To	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Tap	Limit (Mva)
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264	-	340
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0204	-	130
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0184	-	65
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042	-	120
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209	-	100
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187	-	65
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045	-	120
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0102	-	60

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส(ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Tap	Limit (Mva)
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0085	-	120
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0045	-	50
11	6	9	0	0.2080	0	1.012	60
12	6	10	0	0.5560	0	0.985	30
13	9	11	0	0.2080	0	-	60
14	9	10	0	0.1100	0	-	60
15	4	12	0	0.2560	0	0.964	60
16	12	13	0	0.1400	0	-	60
17	12	14	0.1231	0.2559	0	-	30
18	12	15	0.0662	0.1304	0	-	30
19	12	16	0.0945	0.1987	0	-	30
20	14	15	0.2210	0.1997	0	-	20
21	16	17	0.0824	0.1932	0	-	20
22	15	18	0.1070	0.2185	0	-	20
23	18	19	0.0639	0.1292	0	-	20
24	19	20	0.0340	0.0680	0	-	20
25	10	20	0.0936	0.209	0	-	20
26	10	17	0.0324	0.0845	0	-	20
27	10	21	0.0348	0.0749	0	-	20
28	10	22	0.0727	0.1499	0	-	20
29	21	22	0.0116	0.0236	0	-	20
30	15	23	0.100	0.2020	0	-	20
31	22	24	0.1150	0.1790	0	-	20
32	23	24	0.1320	0.2700	0	-	20
33	24	25	0.1885	0.3292	0	-	20
34	25	26	0.2544	0.3800	0	-	20
35	25	27	0.1093	0.2087	0	-	20
36	28	27	0	0.3960	0	0.975	20
37	27	29	0.2198	0.4153	0	-	20
38	27	30	0.3202	0.6027	0	-	20
39	29	30	0.2399	0.4533	0	-	20
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0214	-	30
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0065	-	30

ก.3 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B pu.
			P(Mw)	Q(Mvar)	Qmin	Qmax	P(Mw)	Q(Mvar)	
1	0	1.04	xx	xx	-140	200	55	17	0
2	2	1.01	-	xx	-70	150	3	88	0
3	2	0.985	40	xx	-10	60	41	21	0
4	1	-	-	-	-	-	0	0	0
5	1	-	-	-	-	-	13	4	0
6	2	0.98	-	xx	-8	25	75	2	0
7	1	-	-	-	-	-	0	0	0
8	2	1.005	450	xx	-140	200	150	22	0
9	2	0.98	-	xx	-15	45	121	26	0
10	1	-	-	-	-	-	5	2	0
11	1	-	-	-	-	-	0	0	0
12	2	1.015	310	xx	-150	155	377	24	0
13	1	-	-	-	-	-	18	2.3	0
14	1	-	-	-	-	-	10.5	5.3	0
15	1	-	-	-	-	-	22	5	0
16	1	-	-	-	-	-	43	3	0
17	1	-	-	-	-	-	42	8	0
18	1	-	-	-	-	-	27.2	9.8	10
19	1	-	-	-	-	-	3.3	0.6	0
20	1	-	-	-	-	-	2.3	1	0
21	1	-	-	-	-	-	0	0	0
22	1	-	-	-	-	-	0	0	0
23	1	-	-	-	-	-	6.3	2.1	0
24	1	-	-	-	-	-	0	0	0
25	1	-	-	-	-	-	6.3	3.2	5.9
26	1	-	-	-	-	-	0	0	0
27	1	-	-	-	-	-	9.3	0.5	0
28	1	-	-	-	-	-	4.6	2.3	0
29	1	-	-	-	-	-	17	2.6	0
30	1	-	-	-	-	-	3.6	1.8	0

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส(ต่อ)

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B pu.
			P(Mw)	Q(Mvar)	Qmin	Qmax	P(Mw)	Q(Mvar)	
31	2	-	-	-	-	-	5.8	2.9	0
32	1	-	-	-	-	-	1.6	0.8	0
33	1	-	-	-	-	-	3.8	1.9	0
34	1	-	-	-	-	-	0	0	0
35	1	-	-	-	-	-	6	3	0
36	1	-	-	-	-	-	0	0	0
37	1	-	-	-	-	-	0	0	0
38	1	-	-	-	-	-	14	7	0
39	1	-	-	-	-	-	0	0	0
40	1	-	-	-	-	-	0	0	0
41	1	-	-	-	-	-	6.3	3	0
42	1	-	-	-	-	-	7.1	4.4	0
43	1	-	-	-	-	-	2	1	0
44	1	-	-	-	-	-	12	1.8	0
45	1	-	-	-	-	-	0	0	0
46	1	-	-	-	-	-	0	0	0
47	1	-	-	-	-	-	29.7	11.6	0
48	1	-	-	-	-	-	0	0	0
49	1	-	-	-	-	-	18	8.5	0
50	1	-	-	-	-	-	21	10.5	0
51	1	-	-	-	-	-	18	5.3	0
52	1	-	-	-	-	-	4.9	2.2	0
53	1	-	-	-	-	-	20	10	6.3
54	1	-	-	-	-	-	4.1	1.4	0
55	1	-	-	-	-	-	6.8	3.4	0
56	1	-	-	-	-	-	7.6	2.2	0
57	1	-	-	-	-	-	6.7	2	0

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

Line No.	From	To	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Tap
1	1	2	0.0083	0.0280	0.0645	-
2	2	3	0.0298	0.0850	0.0409	-
3	3	4	0.0112	0.0366	0.019	-
4	4	5	0.0625	0.1320	0.0129	-
5	4	6	0.0430	0.1480	0.0174	-
6	6	7	0.0200	0.1020	0.0138	-
7	6	8	0.0339	0.1730	0.0235	-
8	8	9	0.0099	0.0505	0.0274	-
9	9	10	0.0369	0.1679	0.0220	-
10	9	11	0.0258	0.0848	0.0109	-
11	9	12	0.0648	0.2950	0.0386	-
12	9	13	0.0481	0.1580	0.0203	-
13	13	14	0.0132	0.0434	0.0055	-
14	13	15	0.0269	0.0869	0.0115	-
15	1	15	0.0178	0.0910	0.0494	-
16	1	16	0.0454	0.2060	0.0273	-
17	1	17	0.0238	0.1080	0.0143	-
18	3	15	0.0162	0.0530	0.0272	-
19	4	18	0	0.5550	0	0.970
20	4	18	0	0.4300	0	0.978
21	5	6	0.0302	0.0641	0.0062	-
22	7	8	0.0139	0.0712	0.0097	-
23	10	12	0.0277	0.1262	0.0164	-
24	11	13	0.0223	0.0732	0.0094	-
25	12	13	0.0178	0.0580	0.0302	-
26	12	16	0.0180	0.0813	0.0108	-
27	12	17	0.0397	0.1790	0.0238	-
28	14	15	0.0171	0.0547	0.0074	-
29	18	19	0.4610	0.6850	0	-
30	19	20	0.2830	0.4340	0	-
31	21	20	0	0.7767	0	1.043
32	21	22	0.0736	0.1170	0	-
33	22	23	0.0099	0.0152	0	-

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส(ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Tap
34	23	24	0.1660	0.2560	0.0042	-
35	24	25	0	1.1820	0	1.000
36	24	25	0	1.2300	0	1.000
37	24	26	0	0.0473	0	1.043
38	26	27	0.1650	0.2540	0	-
39	27	28	0.0618	0.0954	0	-
40	28	29	0.0418	0.0587	0	-
41	7	29	0	0.0648	0	0.967
42	25	30	0.1350	0.2020	0	-
43	30	31	0.3260	0.4970	0	-
44	31	32	0.5070	0.7550	0	-
45	32	33	0.0392	0.0360	0	-
46	34	32	0	0.9530	0	0.975
47	34	35	0.0520	0.0780	0.0016	-
48	35	36	0.0430	0.0537	0.0008	-
49	36	37	0.0290	0.0366	0	-
50	37	38	0.0651	0.1009	0.001	-
51	37	39	0.0239	0.0379	0	-
52	36	40	0.0300	0.0466	0	-
53	22	38	0.0192	0.0295	0	-
54	11	41	0	0.7490	0	0.955
55	41	42	0.2070	0.3520	0	-
56	41	43	0	0.4120	0	-
57	38	44	0.0289	0.0585	0.0010	-
58	15	45	0	0.1042	0	0.955
59	14	46	0	0.0735	0	0.900
60	46	47	0.0230	0.0680	0.0016	-
61	47	48	0.0182	0.0233	0	-
62	48	49	0.0834	0.1290	0.0024	-
63	49	50	0.0801	0.1280	0	-
64	50	51	0.1386	0.2200	0	-
65	10	51	0	0.0712	0	0.930
66	13	49	0	0.1910	0	0.895

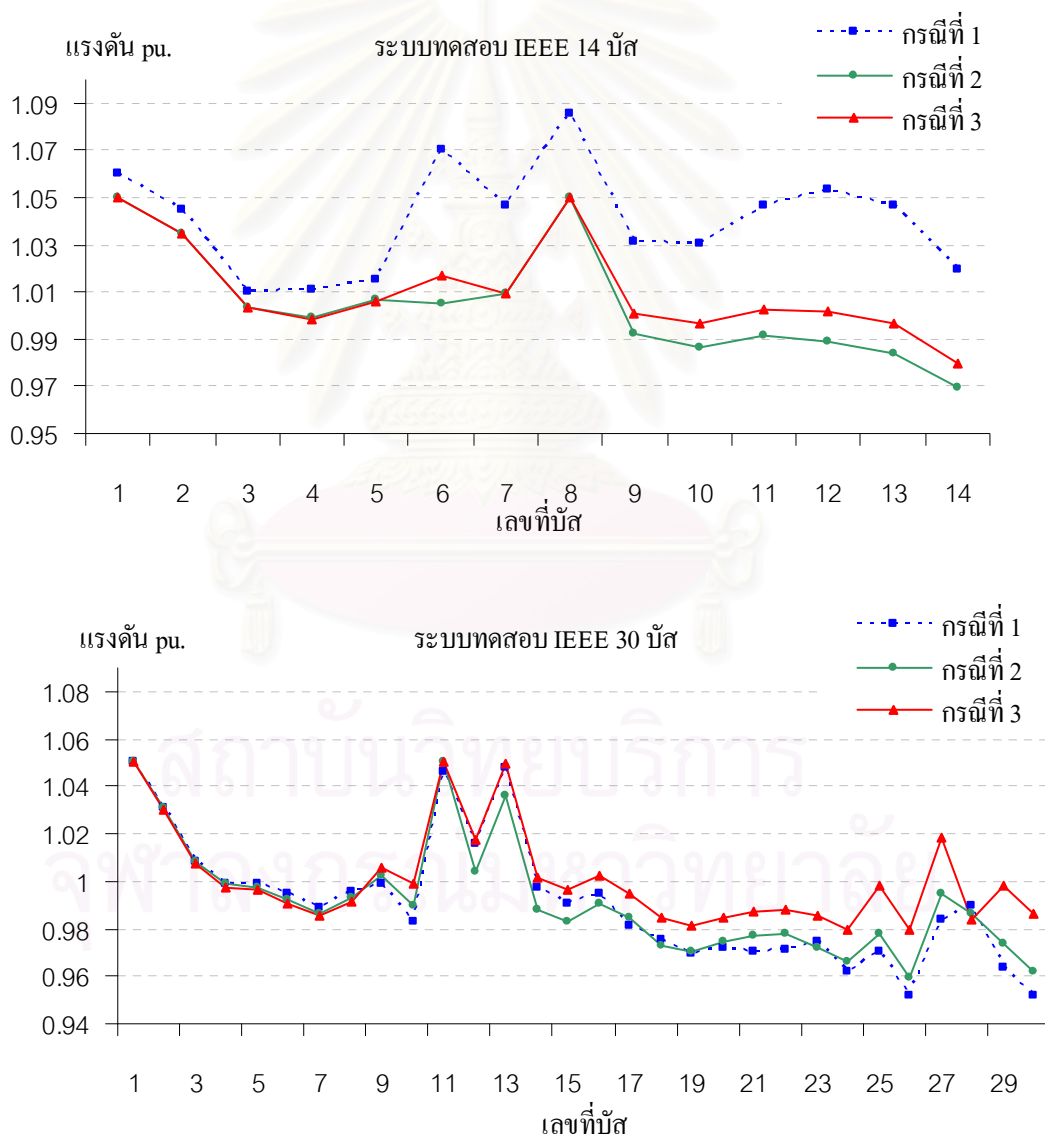
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส(ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Tap
67	29	52	0.1442	0.1870	0	-
68	52	53	0.0762	0.0984	0	-
69	53	54	0.1878	0.2320	0	-
70	54	55	0.1732	0.2265	0	-
71	11	43	0	0.1530	0	0.958
72	44	45	0.0624	0.1242	0.0020	-
73	40	56	0	1.1950	0	0.958
74	56	41	0.5530	0.5490	0	-
75	56	42	0.2125	0.3540	0	-
76	39	57	0	1.3550	0	0.980
77	57	56	0.1740	0.2600	0	-
78	38	49	0.1150	0.1770	0.0015	-
79	38	48	0.0312	0.0482	0	-
80	9	55	0	0.1205	0	0.940

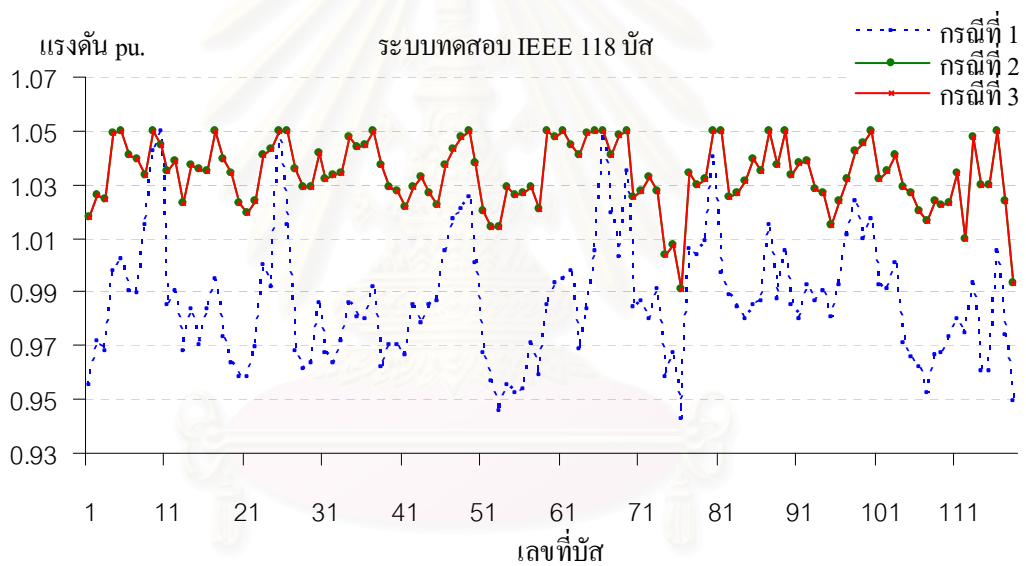
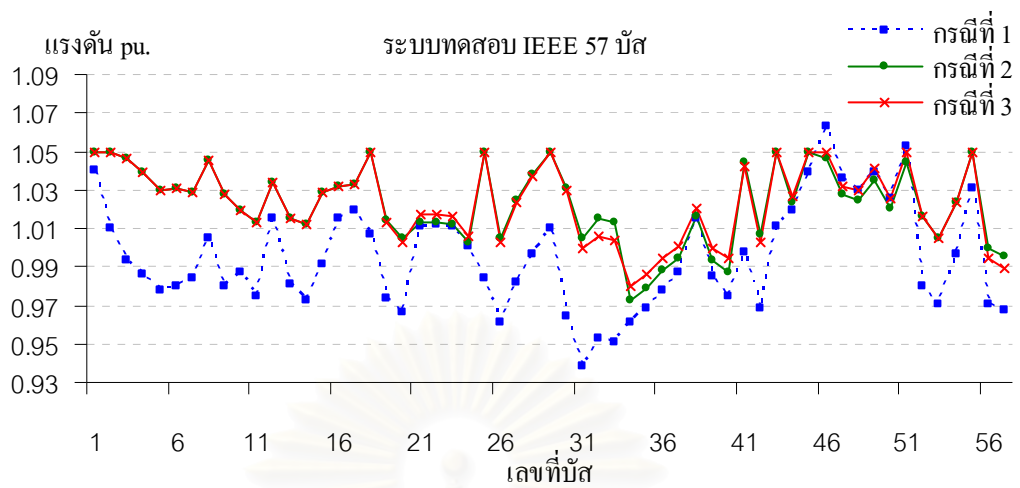
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบโปรแกรมคำนวณออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์

การทดสอบออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์พิจารณาระดับแรงดันแบ่งออกเป็น 4 กรณี
 กรณีที่ 1 ใช้ค่าเดิมของระบบทดสอบ(Base Case) โดยการคำนวณเพาเวอร์โพลว์
 กรณีที่ 2 จำนวนออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์โดยปรับแรงดันในช่วง 0.95-1.05 pu
 กรณีที่ 3 จำนวนออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์โดยปรับแรงดันในช่วง 0.98-1.05 pu
 กรณีที่ 4 จำนวนออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์โดยปรับแรงดันในช่วง 0.95-1.06 pu
 ผลการทดสอบการคำนวณออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์แสดงดังรูปที่ ข.1

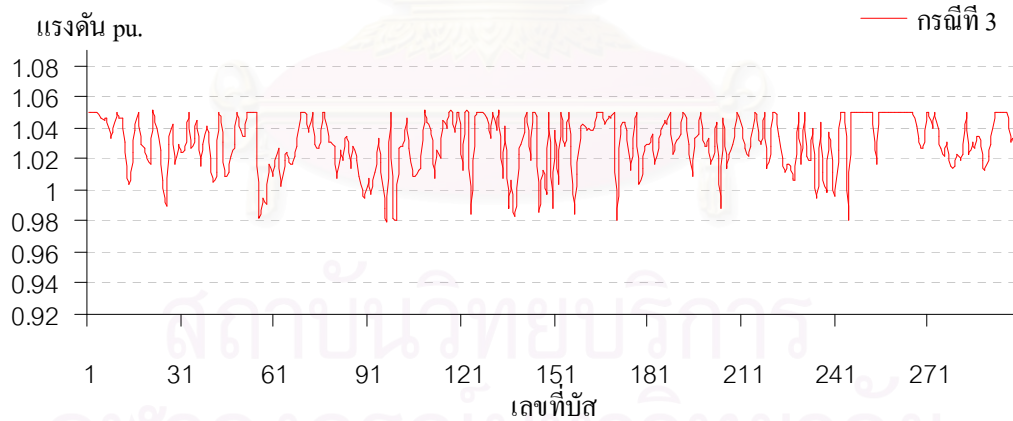
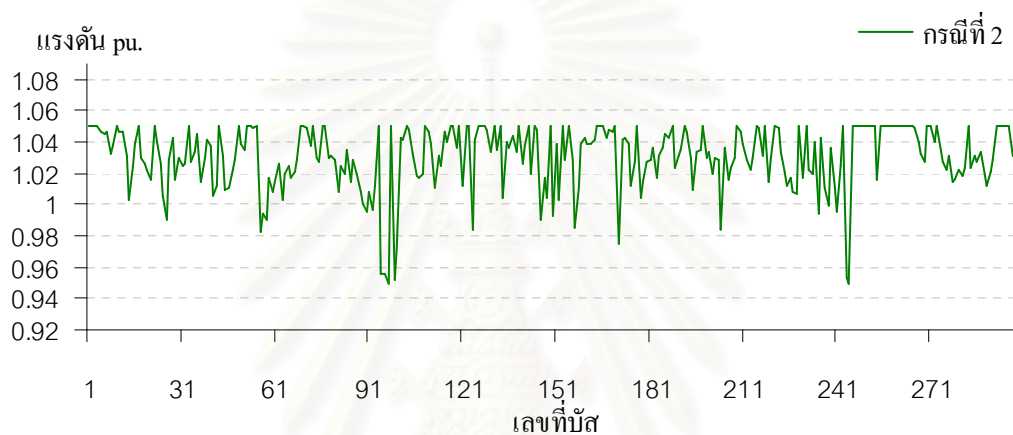
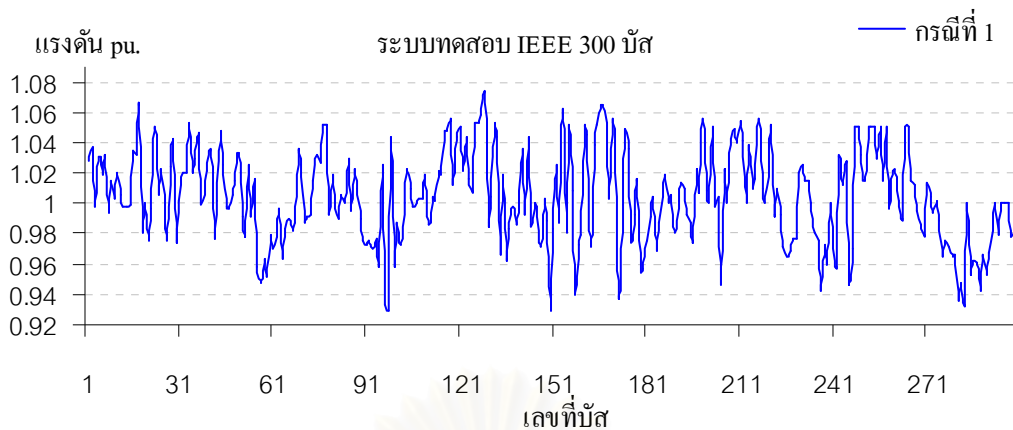


รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบแรงดันของออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบแรงดันของออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์(ต่อ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบแรงดันของออฟติมอลเพาเวอร์โพลว์(ต่อ)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมชาย เป็ยนสูงเนิน เกิดวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2539 จากนั้นได้เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย