

การวิเคราะห์ฮอปติคัลเพาเวอร์โฟลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า



นาย วิเศษฐ์ อังสุรัตน์โกมล

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

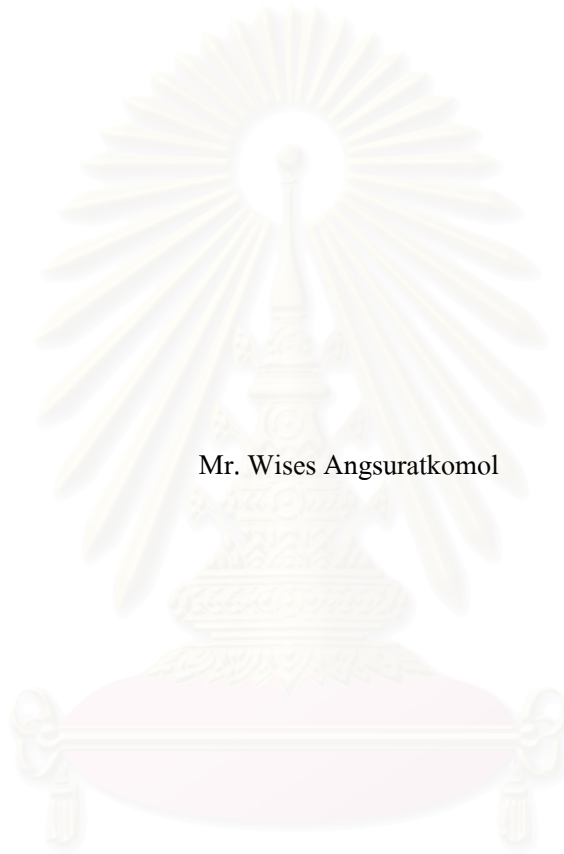
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5551-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STABILITY-CONSTRAINED IN OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS



Mr. Wiset Angsuratkomol

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 2003

ISBN 974-17-5551-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
โดย	นายวิเศษฐ์ อังสุรัตน์โกมล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์)

..... กรรมการ
(ดร.สุเทพ นิมคล้าย)

วิเศษฐ์ อังสุรัตน์โกมล : การวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า. (A STABILITY-CONSTRAINED IN OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ทรงศักดิ์ ชุชมพิพัฒน์, 95 หน้า. ISBN 974-17-5551-1.

วัตถุประสงค์หลักอย่างหนึ่งของการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การควบคุมให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจ่ายโหลดได้อย่างเพียงพอและระบบสามารถดำเนินการอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย โดยมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ปัจจุบันได้มีแนวความคิดที่จะจ่ายโหลดอย่างประหยัดซึ่งรวมข้อจำกัดหลายอย่างในระบบไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุด ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์

ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์เป็นรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เชิงเส้นที่คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ในระบบไฟฟ้าเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุดและระบบยังดำเนินการอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยการใช้ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ วิธีโปรแกรมเชิงเส้น

จากการที่ระบบไฟฟ้ากำลังต้องรองรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบได้ โดยระบบสามารถมีเสถียรภาพหลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้โดยหาจุดทำงานใหม่ที่อยู่ในขอบเขตของเสถียรภาพ ซึ่งจะใช้วิธีการทดลองหาจุดทำงานใหม่ขึ้นมา ถ้าจุดทำงานที่ได้ไม่เหมาะสม จะทำการหาจุดทำงานใหม่ ร่วมกับการตัดสินใจจากประสบการณ์ของวิศวกรควบคุม โดยวิธีดังกล่าวนี้จะใช้เวลาในการคำนวณนานและอาจได้จุดทำงานใหม่ที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแนวความคิดในการรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพที่ใช้ระเบียบวิธี Large Step-size Integration เข้ากับการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์แบบดั้งเดิม ซึ่งทำให้ระบบสามารถหาจุดทำงานใหม่ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยจะแสดงผลการทดสอบด้วยระบบขนาด 9 บัส และระบบขนาด 39 บัส ตามลำดับ

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____
 สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
 ปีการศึกษา _____ 2546 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4370501021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : POWER SYSTEM / TRANSIENT STABILITY / OPTIMAL POWER FLOW / LINEAR PROGRAMMING

WISES ANGSURATKOMOL : A STABILITY-CONSTRAINED IN OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUKUMVIT PHOOMVUTHISARN, Ph.D., THESIS COADVISOR : SONGSAK CHUSANAPIPUTT, Ph.D. 95 pp. ISBN 974-17-5551-1.

Objective of power system control is to maintain loads and to operate the system within its security limit with an objective to minimize total production cost. At present, it has an idea to economic dispatch that includes several constraints solved by optimization technique. This formulation is called an optimal power flow (OPF).

OPF is non-linear optimization problem that finds optimal variables to minimize total production cost and the system should be operated within its security limit. This thesis uses linear programming to formulate OPF.

Since power system should be maintained disturbances that finds new operating point by trail-and-error methods incorporating engineering experience and judgment. From this method, it takes a long time and may not be gotten suitable operating point. For solving this problem, this thesis presents to include stability constraints which is using large step-size integration method into conventional OPF. Then the system can fast find the suitable operating point. This formulation is called a stability-constrained optimal power flow (SCOPF). Simulation results are discussed in 9 buses system and 39 buses system respectively.

Department Electrical Engineering Student's signature _____

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature _____

Academic year 2003 Co-Advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็น ประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีมาตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหา จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ ดร.สุเทพ ฉิมคล้าย ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และ เพื่อนๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.3.1 สมมติฐานที่ใช้.....	2
1.3.2 แบบจำลองที่ใช้.....	2
1.3.2 ระบบที่ใช้ในการศึกษา.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
2. ทฤษฎีพื้นฐานและการประยุกต์ใช้ออปติคัลเพาเวอร์โฟลว์.....	5
2.1 การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์.....	5
2.1.1 สมการเพาเวอร์โฟลว์.....	5
2.1.1.1 สมการกำลังไฟฟ้า.....	6
2.1.1.2 สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	6
2.1.2 การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้น ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน.....	8
2.1.3 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อหาผลเฉลย ของสมการเพาเวอร์โฟลว์.....	9
2.2 ออปติคัลเพาเวอร์โฟลว์.....	13
2.2.1 สมการทั่วไป.....	13
2.2.2 ระเบียบวิธีในการคำนวณออปติคัลเพาเวอร์โฟลว์.....	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2.2.1	14
2.2.2.2	15
2.2.2.3	15
2.2.2.4	16
2.2.2.5	17
2.2.3	18
2.2.4	19
3.	20
3.1	20
3.2	21
3.3	21
3.3.1	21
3.3.2	22
3.3.3	23
3.4	24
3.4.1	24
3.4.2	24
3.4.3	24
3.5	25
3.5.1	25
3.5.2	30
3.6	31
3.6.1	31
3.6.2	31
3.7	32
4.	34
4.1	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่
หน้า

4.1.1	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	34
4.1.2	เงื่อนไขบังคับแบบสมการ.....	35
4.1.3	เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ.....	36
4.2	รูปแบบปัญหา SCOPF	37
4.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF	37
4.4	รูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหา SCOPF	40
4.4.1	ค่า x และ Δx	41
4.4.2	ค่า $\frac{\partial F}{\partial x}$	41
4.4.3	ค่า $\frac{\partial g}{\partial x}$ และ $\frac{\partial h}{\partial x}$	42
4.4.4	ค่า $g(x)$ และ $h(x)$	50
5.	ผลการทดสอบ.....	52
5.1	ระบบขนาด 9 บัส.....	52
5.1.1	กรณีศึกษาที่ 1.....	52
5.1.2	กรณีศึกษาที่ 2.....	55
5.2	ระบบขนาด 39 บัส.....	57
5.2.1	กรณีศึกษาที่ 1.....	57
5.2.2	กรณีศึกษาที่ 2.....	59
6.	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	63
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	63
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	64
	รายการอ้างอิง.....	65
	ภาคผนวก.....	67
	ภาคผนวก ก.....	68
	ภาคผนวก ข.....	78
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	64
ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	64
ก.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	65
ก.4 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่ใช้ในการหาต้นทุนในการผลิต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	65
ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	67
ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	68
ก.7 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	71
ก.8 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่ใช้ในการหาต้นทุนในการผลิต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	72
ข.1 ข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	78
ข.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	79
ข.3 ข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	80
ข.4 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	80
ข.5 ข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	81
ข.6 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	82
ข.7 ข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	83
ข.8 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	85
ข.9 ข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	87
ข.10 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.11 ข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	91
ข.12 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	93



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	ขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	12
2.2	การเคลื่อนจุดคำตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย.....	17
2.3	การเคลื่อนจุดคำตอบภายใน FEASIBLE REGION จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย.....	17
3.1	CLASSICAL MODEL ของเครื่องจักรซิงโครนัส.....	21
3.2	แบบจำลองของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่.....	22
3.3	แบบจำลองของโหลดแบบแอดมิตแดนซ์คงที่.....	22
3.4	แบบจำลองของระบบหลายเครื่องจักรแบบ CLASSICAL MODEL.....	23
3.5	ความสัมพันธ์ของมุมต่าง ๆ เทียบกับกรอบอ้างอิงหมุน.....	26
3.6	วงจรมุมลู่ของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	28
4.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF	38
5.1	ผลตอบของระบบขนาด 9 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF.....	53
5.2	ค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส.....	54
5.3	ค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส	54
5.4	ผลตอบของระบบขนาด 9 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF.....	55
5.5	ค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส.....	56
5.6	ค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส	56
5.7	ผลตอบของระบบขนาด 39 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF.....	57
5.8	ค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส.....	58
5.9	ค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส	59
5.10	ผลตอบของระบบขนาด 39 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF.....	60
5.11	ค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส.....	61
5.12	ค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส	61
ก.1	ระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	68
ก.2	ระบบทดสอบขนาด 39 บัส.....	71

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ เพื่อความเข้าใจในการเรียงลำดับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในหัวข้อย่อยสุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัตถุประสงค์หลักอย่างหนึ่งของการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Control) คือ การควบคุมให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจ่ายโหลดได้อย่างเพียงพอและระบบสามารถดำเนินการอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย (Security Limit) โดยมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ปัจจุบันได้มีแนวความคิดที่จะจ่ายโหลดอย่างประหยัดซึ่งรวมข้อจำกัดหลายอย่างในระบบไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Technique) เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุดซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ (Optimal Power Flow : OPF) [1, 2]

ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์เป็นรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Optimization) ที่คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆในระบบไฟฟ้าเพื่อให้ต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุดและระบบยังดำเนินการอยู่ในขอบเขตที่กำหนด [3] การทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยวิธีที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming : LP) เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ [4] ซึ่งแสดงในหัวข้อ 2.2.2

สิ่งสำคัญในการควบคุมระบบไฟฟ้านอกเหนือจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดอย่างเพียงพอแล้วนั้น ระบบต้องมีเสถียรภาพในขณะที่จ่ายโหลดด้วย โดยระบบต้องสามารถรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบอย่างรวดเร็วหรือที่เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงแบบชั่วคราว ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าต้องใช้สมการสวิง (Swing Equation) ซึ่งในที่นี้จะนำเสนอวิธี Large Step-size Integration ดังแสดงในหัวข้อ 3.7 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

จากการที่ระบบไฟฟ้ากำลังต้องรองรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบได้ โดยระบบสามารถมีเสถียรภาพหลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้โดยหาจุดทำงานใหม่ที่อยู่ภายในขอบเขตของเสถียรภาพ (Stability Limit) ซึ่งจะใช้วิธีการทดลองหาจุดทำงานใหม่ขึ้นมา ถ้าจุดทำงานที่ได้ไม่เหมาะสม จะทำการหาจุดทำงานใหม่ (Trial-and-error Method) ร่วมกับการตัดสินใจ

จากประสบการณ์ของวิศวกรควบคุม โดยวิธีดังกล่าวนี้จะใช้เวลาในการคำนวณนานและอาจได้จุดทำงานใหม่ที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแนวความคิดในการรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพ (Stability Constraints) ที่ใช้ระเบียบวิธี Large Step-size Integration เข้ากับการทำออปติมัลเพาเวอร์โพลว์แบบดั้งเดิม ซึ่งทำให้ระบบสามารถหาจุดทำงานใหม่ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
- 2) เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับอำนวยความสะดวกในการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
- 3) ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การจ่ายไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

แบบจำลองและสมมติฐานที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์มีดังนี้

1.3.1 สมมติฐานที่ใช้

เนื่องจากการศึกษาเสถียรภาพของระบบนั้น จะใช้แบบจำลองของระบบหลายเครื่องจักรแบบ Classical Model ดังนั้นจะสมมติให้

- 1) กำลังทางกลด้านเข้า P_m มีค่าคงที่
- 2) ไม่รวมผลค่าการหน่วง (Damping)

1.3.2 แบบจำลองที่ใช้

แบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์มี 3 แบบ คือ

- 1) แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Model)

ใช้ Classical Model โดยเครื่องจักรซิงโครนัสถูกแทนด้วยแรงดันคงที่ E หลังรีแอกแตนซ์ชั่วคราว x'_d

- 2) แบบจำลองของโหลด (Load Model)

ใช้โหลดเป็นแบบอิมพีแดนซ์คงที่

3) แบบจำลองของระบบหลายเครื่องจักร (Multimachine System Model)

ใช้ Classical Model โดยใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแบบจำลองของโหลดตามที่ได้อ้างข้างต้น

1.3.3 ระบบที่ใช้ในการศึกษา

ระบบที่ใช้ในการศึกษา, ทดสอบและเปรียบเทียบผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระบบขนาด 9 บัส และระบบขนาด 39 บัส ตามลำดับ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
- 2) ศึกษาทฤษฎีและหลักการของออปติมัลเพาเวอร์โพลว์
- 3) ศึกษาทฤษฎีและหลักการของเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า
- 4) ศึกษาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบบจำลองของโหลด
- 5) ออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์
- 6) พัฒนาและทดสอบโปรแกรม
- 7) วิเคราะห์ระบบตัวอย่าง
- 8) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 9) เรียบเรียงและพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
- 2) สามารถใช้ผลที่ได้จากงานวิจัยเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การจ่ายไฟฟ้า เพื่อให้มีเสถียรภาพดีขึ้น

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพลว์ ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์ และวิธีการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพลว์, ระเบียบวิธีต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ รวมถึงการประยุกต์ใช้ออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้น

บทที่ 3 กล่าวถึง เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพแบบชั่วคราว ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในระบบไฟฟ้ากำลัง กล่าวถึงเสถียรภาพแบบสวิงครั้งแรก, แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์, ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา จากนั้นจะนำเสนอสมการสวิง กรอบอ้างอิงที่ใช้ รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธี Large Step-size Integration

บทที่ 4 กล่าวถึง การวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ในบทนี้จะอธิบายถึงส่วนประกอบต่าง ๆ และเงื่อนไขบังคับที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยละเอียด แสดงอัลกอริทึมในการคำนวณ รวมทั้งรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหา SCOPF ด้วย

บทที่ 5 กล่าวถึง ผลการทดสอบที่ได้จากการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยระบบทดสอบที่นำมาใช้คือ ระบบขนาด 9 บัส และระบบขนาด 39 บัส ตามลำดับ ในการทดสอบของแต่ละระบบจะทดสอบโดยใช้การคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพลว์แบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับผลการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและเสถียรภาพของระบบที่ได้จากทั้งสองวิธี และวิเคราะห์ผล

บทที่ 6 กล่าวถึง บทสรุปของการวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและการประยุกต์ใช้ออปติมัลเพาเวอร์ฟลว์

เนื่องจากความต้องการในการใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มกำลังและวางแผนการผลิตไฟฟ้าที่ดีเพื่อรองรับการเจริญเติบโตดังกล่าว ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเกิดขึ้นเมื่อระบบผลิตนั้นมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งเครื่องและเชื่อมโยงกันภายในระบบเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลดอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องไม่เท่ากัน ทำให้จำเป็นต้องทำการศึกษาปัญหาการจ่ายโหลดเพื่อสามารถกำหนดขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องได้อย่างเหมาะสมและเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตของระบบโดยรวมให้ลดลงอีกด้วย

การคำนวณออปติมัลเพาเวอร์ฟลว์เป็นการจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องกับการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่ต้องการ โดยคำนึงถึงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าหรือสมการเพาเวอร์ฟลว์ (Power Flow Equations) และเงื่อนไขด้านต่าง ๆ ของระบบ (Constraints)

ทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์ฟลว์แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

- 1) การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลว์ (Power Flow Analysis)
- 2) ออปติมัลเพาเวอร์ฟลว์ (Optimal Power Flow : OPF)

2.1 การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลว์ (Power Flow Analysis)

2.1.1 สมการเพาเวอร์ฟลว์ (Power Flow Equations)

เพาเวอร์ฟลว์ หรือ โหลดฟลว์ เป็นการวิเคราะห์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์ฟลว์ เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลต่าง ๆ ของระบบได้ เช่น ขนาดของแรงดันบัส มุมของแรงดันบัส กำลังที่ไหลบนสายส่ง กำลังสูญเสียในระบบส่ง เป็นต้น ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะได้นำไปใช้ในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์ฟลว์ต่อไป

สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาเพาเวอร์ฟลว์ของระบบไฟฟ้ากำลังมีสมการสำคัญ 2 สมการ คือ สมการกำลังไฟฟ้า และสมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง (Network Performance Equations) ดังกล่าวต่อไปนี้

2.1.1.1 สมการกำลังไฟฟ้า [5]

สมการกำลังไฟฟ้าที่เข้าบัส i ใด ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความสัมพันธ์กับแรงดันและกระแสดังนี้

$$S_i = V_i I_i^* = P_i + jQ_i \quad (2.1)$$

โดยที่	S_i	คือ	กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลเข้าบัส i
	V_i	คือ	แรงดันที่บัส i
	I_i	คือ	กระแสที่ไหลเข้าบัส i
	P_i	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าบัส i
	Q_i	คือ	กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าบัส i
	*	คือ	สังยุคเชิงซ้อน (Complex Conjugate)

สมการที่ (2.1) ได้มาจากการกำหนดให้กำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าเป็นบวกเสมอสำหรับโหลดแบบล่าหลัง (Lagging Load) หรือกระแสตามหลังแรงดัน

2.1.1.2 สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง (Network Performance Equations) [6]

เมื่อพิจารณาในกรอบอ้างอิงบัส (Bus Frame of Reference) สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วยบัสที่ไม่รวมบัสอ้างอิงจำนวน N บัส เป็นสมการที่สร้างขึ้นจากการนำเอาสมการโหนด (Nodal Equations) จำนวน N สมการมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ ดังนั้น สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังที่แสดงในรูปบัสแอดมิตแตนซ์จะมีลักษณะดังสมการที่ (2.2)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

เขียนสมการที่ (2.2) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.3)

$$I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (2.3)$$

โดยที่	I_{BUS}	คือ	เวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส
	V_{BUS}	คือ	เวกเตอร์ของกลุ่มแรงดันบัส
	Y_{BUS}	คือ	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

จากสมการที่ (2.2) สามารถเขียนสมการของกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสได้ดังนี้

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.1) จะได้

$$S_i^* = V_i^* I = P_i - jQ_i \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N \quad (2.5)$$

แทนค่าสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.5) จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสังยุคเชิงซ้อนที่ไหลเข้าบัส i ดังสมการที่ (2.6)

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \left(\sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \right) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N \quad (2.6)$$

จากบัสแอดมิตแตนซ์และแรงดันที่บัสสามารถเขียนในรูปเชิงขั้ว (Polar Form) ได้ดังนี้

$$Y_{in} = |Y_{in}| \angle \phi_{in} = |Y_{in}| \cos \phi_{in} + j |Y_{in}| \sin \phi_{in} = G_{in} + jB_{in} \quad (2.7)$$

$$V_i = |V_i| \angle \theta_i = |V_i| (\cos \theta_i + j \sin \theta_i) \quad (2.8)$$

$$V_n = |V_n| \angle \theta_n = |V_n| (\cos \theta_n + j \sin \theta_n) \quad (2.9)$$

แทนค่าสมการที่ (2.7)-(2.9) ลงในสมการที่ (2.6) จะได้

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \angle (\phi_{in} + \theta_n - \theta_i) \quad (2.10)$$

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \cos(\phi_{in} + \theta_n - \theta_i) \quad (2.11)$$

$$Q_i = -\sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \sin(\phi_{in} + \theta_n - \theta_i) \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.11)-(2.12) แสดงอยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate Form) ของสมการเพาเวอร์โพลาร์ ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามลำดับ โดยที่สมการเพาเวอร์โพลาร์ทั้ง 2 สมการนั้นมีลักษณะเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นต้องใช้วิธีการแก้สมการไม่เชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยของสมการ วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้สมการไม่เชิงเส้นโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ คือ วิธีการวิเคราะห์เชิงเลข (Numerical Analysis Method) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีของเกาส์ (Gauss Method), วิธีของเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel Method) และวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) เป็นต้น วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพลาร์มากที่สุด คือ วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากข้อดี คือ มีคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบที่รวดเร็วแบบกำลังสอง (Quadratic Convergence) [7] ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด

น้อยกว่าวิธีอื่น และจำนวนรอบของการคำนวณซ้ำไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้น
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสันในการหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โฟลว์

2.1.2 การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน [7]

ในการหาผลเฉลยจะพิจารณาระบบสมการไม่เชิงเส้นจำนวน N สมการ และจำนวน
ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า N ตัวแปรดังสมการที่ (2.13)

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_2 \\ &\vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_N \end{aligned} \quad (2.13)$$

โดยที่ x_1, x_2, \dots, x_N คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

b_1, b_2, \dots, b_N คือ ตัวแปรที่ทราบค่า

ถ้าเริ่มรอบการคำนวณด้วยค่าประมาณเริ่มต้น $x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0$ สำหรับตัวแปรที่ไม่ทราบค่า
และถ้า $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N$ เป็นค่าปรับแต่ง (Correction) โดยใช้ปรับค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพื่อให้
ผลเฉลยมีความถูกต้อง จะได้

$$\begin{aligned} f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) &= b_1 \\ f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) &= b_2 \\ &\vdots \\ f_N(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) &= b_N \end{aligned} \quad (2.14)$$

ใช้อนุกรมเทย์เลอร์ประมาณฟังก์ชันในสมการที่ (2.14) โดยกำจัดพจน์ที่มีอันดับอนุพันธ์
สูงกว่าหนึ่งทิ้งไป และเมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ จะได้

$$\begin{aligned} &f_i(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) \\ &= f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0) + \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_N} \Delta x_N \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) จะได้เซตของสมการเชิงเส้นอยู่ในรูปเมตริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ \vdots \\ b_N - f_N(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_N^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

หรือ
$$\Delta f = J \Delta x \quad (2.17)$$

โดยที่ J คือ เมตริกซ์ของอนุพันธ์ย่อยซึ่งเรียกว่า จาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix)

การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสันจะอาศัยวิธีการทำซ้ำ (Iterative method) โดยการสมมติค่าคำตอบในตอนเริ่มต้น แล้วคำนวณหาค่าปรับแต่ง (Correction) เพื่อนำไปปรับค่าคำตอบในรอบถัดไป สูตรการปรับค่าแสดงดังสมการที่ (2.18)

$$x_i^1 = x_i^0 + \Delta x_i \quad (2.18)$$

2.1.3 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพลว์ [7]

จากสมการที่ (2.11)-(2.12) ทำให้ทราบว่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละบัสเป็นฟังก์ชันขึ้นกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันของทุกบัส เมื่อเราระบุค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละบัสแทนด้วยตัวยก sp จะสามารถเขียนสมการเพาเวอร์โพลว์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_1(\theta_1, \dots, \theta_N, V_1, \dots, V_N) &= P_1^{SP} \\ &\vdots \\ P_N(\theta_1, \dots, \theta_N, V_1, \dots, V_N) &= P_N^{SP} \\ Q_1(\theta_1, \dots, \theta_N, V_1, \dots, V_N) &= Q_1^{SP} \\ &\vdots \\ Q_N(\theta_1, \dots, \theta_N, V_1, \dots, V_N) &= Q_N^{SP} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ในการทำงานเกี่ยวกับสมการที่ (2.16) สามารถแสดงสมการที่ (2.19) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} P_1^{SP} - P_1(\theta_1^0, \dots, \theta_N^0, V_1^0, \dots, V_N^0) \\ \vdots \\ P_N^{SP} - P_N(\theta_1^0, \dots, \theta_N^0, V_1^0, \dots, V_N^0) \\ Q_1^{SP} - Q_1(\theta_1^0, \dots, \theta_N^0, V_1^0, \dots, V_N^0) \\ \vdots \\ Q_N^{SP} - Q_N(\theta_1^0, \dots, \theta_N^0, V_1^0, \dots, V_N^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_N \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_N} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \theta_N} & \frac{\partial P_N}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_N} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_N} & \frac{\partial Q_N}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{bmatrix}$$

สมการที่ (2.20) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกะทัดรัดได้ดังสมการที่ (2.21)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

ในทางปฏิบัติ จะอาศัยคุณสมบัติการสมมาตรของสมาชิกในเมตริกซ์จacobian เพื่อลดจำนวนหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลของสมาชิกในเมตริกซ์จacobian ดังนั้นจึงปรับปรุงสมการที่ (2.21) เป็นดังสมการที่ (2.22)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

สมาชิกของเมตริกซ์จacobian แสดงได้ดังสมการที่ (2.23)-(2.30)

สมาชิกนอกแนวทแยงมุม (Off-Diagonal Element)

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = -V_i V_j Y_{ij} \sin(\phi_{ij} + \theta_j - \theta_i) \quad (2.23)$$

$$N_{ij} = V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i V_j Y_{ij} \cos(\phi_{ij} + \theta_j - \theta_i) \quad (2.24)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i V_j Y_{ij} \cos(\phi_{ij} + \theta_j - \theta_i) \quad (2.25)$$

$$L_{ij} = V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i V_j Y_{ij} \sin(\phi_{ij} + \theta_j - \theta_i) \quad (2.26)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุม (Diagonal Element)

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii}V_i^2 \quad (2.27)$$

$$N_{ii} = V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i + G_{ii}V_i^2 \quad (2.28)$$

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii}V_i^2 \quad (2.29)$$

$$L_{ii} = V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = Q_i - B_{ii}V_i^2 \quad (2.30)$$

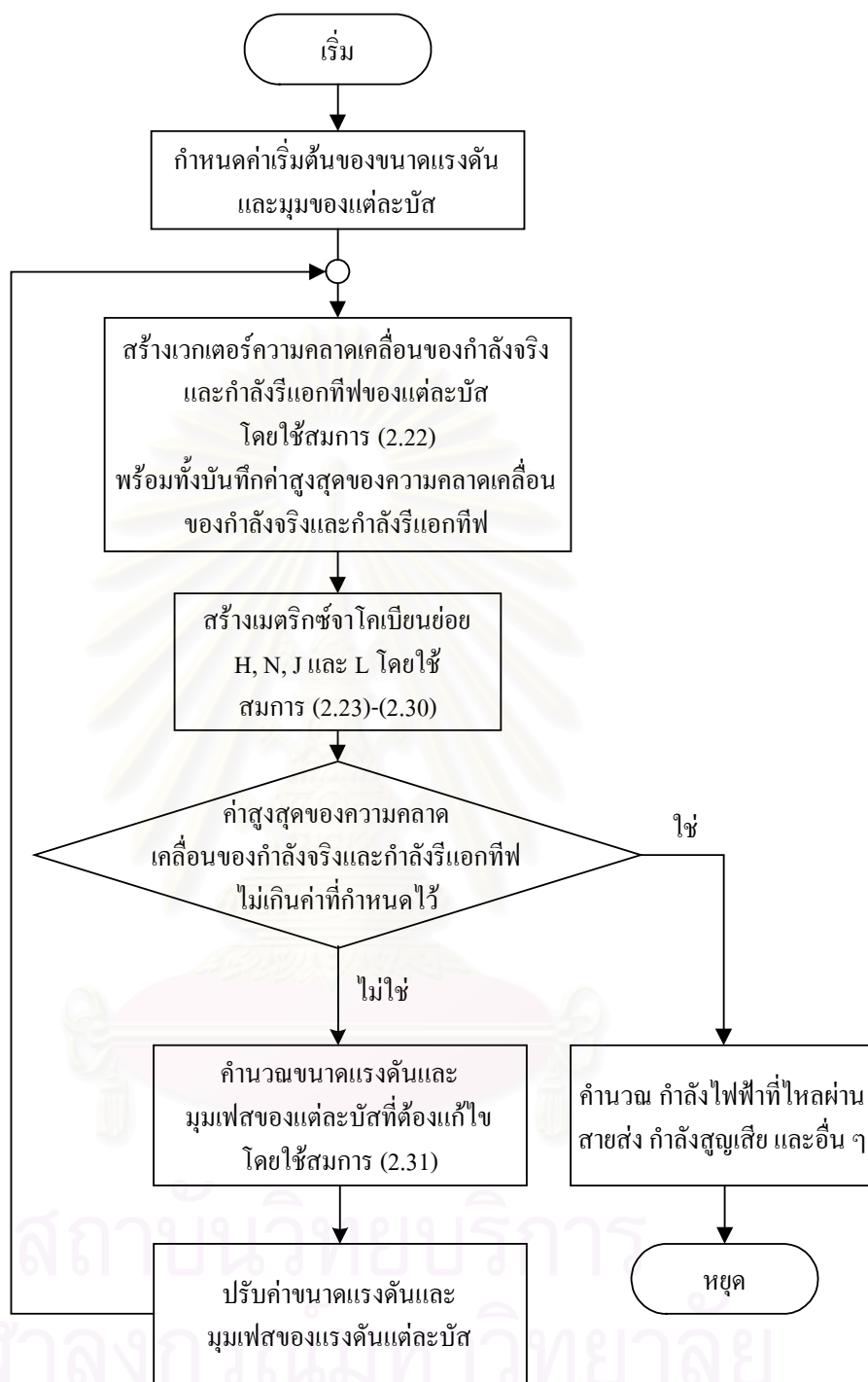
เมื่อพิจารณาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนที่ได้แสดงดังสมการที่ (2.23)-(2.26) พบว่า

$$H_{ij} = L_{ij} \quad \text{และ} \quad N_{ij} = -J_{ij} \quad \text{เมื่อ } i \neq j$$

ทำให้สามารถลดจำนวนหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลของสมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียนลงได้เป็นจำนวนมาก สำหรับสูตรการปรับค่าของ θ_i และ V_i แสดงดังสมการที่ (2.31)

$$\begin{aligned} \theta_i^1 &= \theta_i^0 + \Delta\theta^0 \\ V_i^1 &= V_i^0 \left(1 + \frac{\Delta V_i^0}{V_i} \right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการคำนวณพาวเวอร์โพล์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.2 ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ (Optimal Power Flow : OPF)

ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์มีประวัติในการพัฒนามายาวนาน มีการกล่าวถึงครั้งแรกในปี ค.ศ. 1962 โดย Carpentier [8] และใช้เวลานานในการพัฒนาให้เป็นอัลกอริทึม (Algorithm) ที่นำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน โดยทั่วไปจะใช้ความสามารถของ OPF ในการหาผลตอบเหมาะที่สุด (Optimal Solution) โดยคำนึงถึงความมั่นคง (Security) ของระบบด้วย [9]

การคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถพิจารณาในรูปของผลที่ได้จากการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมได้อย่างอัตโนมัติเพื่อสนองเงื่อนไขของระบบในขณะที่ทำการหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ไปด้วย [5]

2.2.1 สมการทั่วไป

ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยทั่วไปสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของปัญหาได้ดังนี้

$$\text{minimize } F(x, u) \quad (2.32)$$

$$\text{subject to } g(x, u) = 0 \quad (2.33)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (2.34)$$

โดยที่ $F(x, u)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$g(x, u)$ คือ เซตของเงื่อนไขบังคับแบบสมการ (Equality Constraints)

$h(x, u)$ คือ เซตของเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ (Inequality Constraints)

x คือ เวกเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวแปรพึ่งพิง (Dependent Variables)

และพารามิเตอร์คงที่ (Fixed Parameters)

u คือ เวกเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวแปรควบคุม (Control Variables)

วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์มีหลายวิธีการ โดยแต่ละวิธีการนั้นจะมีลักษณะและวิธีการใช้งานต่างกันออกไป ซึ่งในวิธีการคำนวณแต่ละแบบนี้ ต่างอาศัยหลักการพื้นฐานที่เหมือนกัน คือ สมการลากรอง (Lagrange Equation) และเงื่อนไขจำเป็น (Necessary Condition) ของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) ในการแก้ปัญหา เพื่อคำนวณค่าเหมาะที่สุด (Optimization) คำตอบของสมการที่ (2.32) สามารถหาได้โดย เงื่อนไขจำเป็นของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) จากสมการลากรอง $L(x, \lambda, \mu)$ โดยเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายจะกำหนดให้ x (ตัวหนา) เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวแปรพึ่งพิง, พารามิเตอร์คงที่ และตัวแปรควบคุม (แทนค่า x และ u) ดังแสดงต่อไปนี้

$$L(\mathbf{x}, \lambda, \mu) = F(\mathbf{x}) + \lambda^T g(\mathbf{x}) + \mu^T h(\mathbf{x}) \quad (2.35)$$

กำหนดให้ \mathbf{x}^* , λ^* , μ^* เป็นเวกเตอร์ตัวแปร ณ จุดคำตอบของสมการที่ (2.32) จะได้ว่าสมการต่อไปนี้จะต้องเป็นจริง คือ

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}_r} = \frac{\partial (F(\mathbf{x}) + \lambda^T g(\mathbf{x}) + \mu^T h(\mathbf{x}))}{\partial \mathbf{x}_r} \Big|_{\mathbf{x}^*, \lambda^*, \mu^*} = 0 \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_s} = g_s(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}^*} = 0 \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_t} = h_t(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}^*} = 0 \quad \text{เมื่อ } \mu_t > 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_t} = h_t(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}^*} \leq 0 \quad \text{เมื่อ } \mu_t = 0 \quad (2.39)$$

โดยสมการที่ (2.38) และ (2.39) สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ

$$\mu^T h(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (2.40)$$

โดย $\mu_t \geq 0$ และ r, s, t คือ ลำดับที่สมาชิกของเวกเตอร์ \mathbf{x} , λ , μ ตามลำดับ

2.2.2 ระเบียบวิธีในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์

ระเบียบวิธีที่สำคัญในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถสรุปได้ดังนี้

2.2.2.1 วิธีกรวนซ้ำเพื่อหาค่าแลมบ์ดา (Lambda Iteration Method) [3]

วิธีการนี้เป็นวิธีการทั่วไปในการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด (Economic Dispatch) โดยสมมติในกรณีที่มีเงื่อนไขบังคับสมดุลกำลังงานเพียงสมการเดียว หลักการในการคำนวณคือ เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าแลมบ์ดา จากนั้นหาค่ากำลังการผลิตของบัสต่างๆ จากสมการที่ (2.36) หากรวมกำลังการผลิตที่ได้แล้ว ไม่เท่ากับโหลดทั้งหมดของระบบก็จะทำการปรับค่าแลมบ์ดาใหม่ทำซ้ำเช่นนี้จนกว่ากำลังการผลิตรวมจะเท่ากับโหลดทั้งหมดของระบบ

อย่างไรก็ตาม จะพบว่าหากใช้วิธีการนี้ในการคำนวณการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์จะมีความยุ่งยากในการคำนวณซ้ำเกิดขึ้น เนื่องจากตัวคูณสัมประสิทธิ์ในสมการลากรองอาจมีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับจำนวนเงื่อนไขบังคับแบบสมการและจำนวนเงื่อนไขบังคับแบบอสมการที่มีผล (Active Inequality Constraint) การปรับค่าแลมบ์ดาใหม่ให้เหมาะสมจึงต้องอาศัยวิธีการที่เหมาะสมซึ่งกระทำได้ไม่ง่าย

ความรวดเร็วในการหาคำตอบของวิธีการนี้ ขึ้นอยู่กับวิธีการปรับค่าแลมบ์ดา หรือสัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการลากรองเป็นสำคัญ

2.2.2.2 วิธีการใช้เกรเดียนต์ (Gradient Method) [3, 13]

หลักการของวิธีการใช้เกรเดียนต์ คือ การใช้เกรเดียนต์ของสมการลากรอง $L(\mathbf{x}, \lambda, \mu)$ เป็นเวกเตอร์กำหนดทิศทางในการลู่เข้าหาคำตอบ (Steepest Descent Direction) ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{x}^{i+1} = \mathbf{x}^i - \alpha \nabla L \quad (2.41)$$

โดย \mathbf{x}^i คือ เวกเตอร์ของตัวแปรการคำนวณทั้งหมดในรอบที่ i
 α คือ ปริมาณ สเกลาร์เพื่อกำหนดขนาดของการปรับค่าเข้าหาคำตอบ
 ∇L คือ เวกเตอร์เกรเดียนต์ของสมการลากรอง $L(\mathbf{x}, \lambda, \mu)$ ดังแสดงในสมการที่ (2.42)

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x_1} \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

โดย n คือ จำนวนตัวแปรในการคำนวณทั้งหมด

ข้อเสียของวิธีการใช้เกรเดียนต์ คือ ความล่าช้าในการลู่เข้าหาคำตอบ และความไม่เหมาะสมในการคำนวณการวิเคราะห์ห่อออปติมัลเพาเวอร์โพลว์ หากในการคำนวณนั้นมีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการรวมอยู่ด้วย

2.2.2.3 วิธีการของนิวตัน (Newton's Method) [3, 13]

ในวิธีการของนิวตันนี้เป็นการนำการกระจายอนุกรมเทเลอร์อันดับที่หนึ่งมาใช้ในการแก้ปัญหาสมการเงื่อนไขจำเป็นของ Karush-Kuhn-Tucker ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ

$$\mathbf{x}^{i+1} = \mathbf{x}^i - \left[\frac{\partial \nabla L}{\partial \mathbf{x}} \right]^{-1} \nabla L \quad (2.43)$$

โดย \mathbf{x}^i คือ เวกเตอร์ของตัวแปรในการคำนวณทั้งหมดในรอบที่ i

ส่วน ∇L และ $\left[\frac{\partial \nabla L}{\partial \mathbf{x}} \right]$ มีค่าตามสมการที่ (2.44) และ (2.45) ตามลำดับ

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x_1} \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\left[\frac{\partial \nabla L}{\partial \mathbf{x}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 L}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial x_2 \partial x_2} & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 L}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 L}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

โดย n คือ จำนวนตัวแปรการคำนวณทั้งหมด

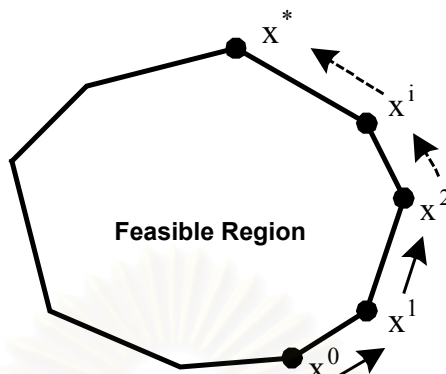
ในวิธีการของนิวตันนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการของเกรเดียนท์ คือ สามารถลู่เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วกว่า อย่างไรก็ตามในวิธีการของนิวตันนี้ยังคงมีปัญหาในการคำนวณอนุพันธ์พหุคูณพหุคูณโพลีในกรณีที่ระบบมีข้อจำกัดแบบอสมการร่วมอยู่ด้วย

2.2.2.4 วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Method) [3, 13-15]

วิธีโปรแกรมเชิงเส้นนี้มีข้อได้เปรียบเหนือวิธีการทั้งสามข้างต้น คือ สามารถคำนวณอนุพันธ์พหุคูณพหุคูณโพลีได้ง่าย แม้ในระบบจะมีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการร่วมอยู่ด้วย อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาข้อจำกัดของระบบทั้งที่เป็นสมการและอสมการจะพบว่า มีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ เช่น สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า อสมการพิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าบนสายส่ง ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization Method)

โดยความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบจะขึ้นอยู่กับ จุดเริ่มต้นของระบบในการหาคำตอบ และจำนวนเงื่อนไขบังคับของระบบ เนื่องจากจุดคำตอบของระบบสมการในการคำนวณอนุพันธ์พหุคูณพหุคูณโพลี จะอยู่บนจุดยอด (Vertex) ของบริเวณเซตของจุดคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) โดยวิธีการหาคำตอบของวิธีโปรแกรมเชิงเส้น คือ การเคลื่อนจุดคำตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนกว่าจะพบคำตอบที่เป็นค่าเหมาะสมที่สุด ดังนั้นหากมีเงื่อนไขบังคับของระบบอยู่มาก และ

จุดเริ่มต้นของการคำนวณหาเงาไกลจุดค่าตอบสุดท้าย จะทำให้จำนวนรอบการหาจุดค่าตอบมากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.2



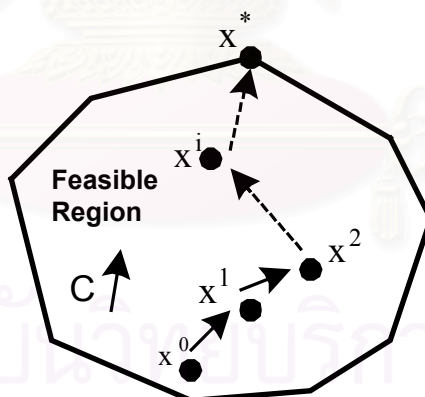
รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนจุดค่าตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนถึงจุดค่าตอบสุดท้าย

โดย X^0 คือ เวกเตอร์จุดค่าตอบเริ่มต้นในการคำนวณ

X^* คือ เวกเตอร์จุดค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณ

2.2.2.5 วิธีการใช้จุดค่าตอบภายใน (Interior Point Method) [3, 13, 16, 17]

ในวิธีการนี้จุดค่าตอบทุกๆรอบในการคำนวณจะอยู่ภายในบริเวณเซตของจุดค่าตอบที่เป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนจุดค่าตอบภายใน Feasible Region จนถึงจุดค่าตอบสุดท้าย

โดย X^0 คือ เวกเตอร์จุดค่าตอบเริ่มต้นในการคำนวณ

X^* คือ เวกเตอร์จุดค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณ

C คือ ทิศทางในการดูเข้าหาค่าตอบ

โดยเทคนิคที่สามารถนำมาใช้งานในปัจจุบันมีมากมาย เช่น การใช้ฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithm Function) วิธีการพริมาล - ดูอัล (Primal-Dual Method) เป็นต้น

วิธีการนี้สามารถคำนวณการวิเคราะห์ห่อออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์ได้ง่าย แม้ในระบบมีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการเช่นเดียวกับวิธีโปรแกรมเชิงเส้น ส่วนความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบโดยทั่วไปสามารถลู่เข้าได้เร็ว อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับวิธีการหาทิศทางกรปรับค่าสู่จุดคำตอบด้วย

วิธีการแก้ปัญหาออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์มีหลายวิธีที่ได้ถูกนำเสนอ [4] เมื่อจำแนกตามวิธีการทำให้เหมาะที่สุด (Optimization Techniques) สามารถจำแนกวิธีการแก้ปัญหาออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

- วิธีที่ใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้น (Linear Programming : LP)
- วิธีที่ใช้การโปรแกรมแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Programming : NLP)

วิธีการแก้ปัญหาออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์โดยใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้นมีข้อดี [6] คือ

- 1) มีความเชื่อถือได้ในการทำให้เหมาะที่สุด (Optimization)
- 2) มีความสามารถในการรองรับความเป็นไปไม่ได้ของปัญหาได้อย่างรวดเร็ว
- 3) ช่วงของขอบเขตการทำงานมีความเหมาะสมและควบคุมได้รวมทั้งเงื่อนไขบังคับที่อาจเกิดขึ้นได้
- 4) การคำนวณมีความเร็วสูงเมื่อระบบไฟฟ้าไม่ใหญ่จนเกินไป
- 5) วิธีการโปรแกรมแบบเชิงเส้นมีความยืดหยุ่นในการแบ่งแยกความสมมูลระหว่างความเร็วในการคำนวณกับความถูกต้องในการลู่เข้ามากกว่าวิธีการโปรแกรมแบบไม่เชิงเส้นเนื่องจากสามารถปรับค่าได้จากการวนซ้ำในการคำนวณ
- 6) สามารถแก้ปัญหาเงื่อนไขบังคับแบบอสมการได้ง่าย

จากข้อดีหลายประการที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการแก้ปัญหาออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์แบบเชิงเส้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2.3 การทำออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์โดยใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้น

รูปแบบของปัญหาออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์ที่แสดงในชุดสมการที่ (2.32)-(2.34) เมื่อใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้นในการแก้ปัญหา สามารถเขียนรูปแบบของปัญหาออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์ได้ดังนี้

$$\text{minimize } F(x^0 + \Delta x, u^0 + \Delta u) \quad (2.46)$$

$$\text{subject to } g(x^0 + \Delta x, u^0 + \Delta u) = 0 \quad (2.47)$$

$$h(x^0 + \Delta x, u^0 + \Delta u) \leq 0 \quad (2.48)$$

โดยที่ x^0, u^0 คือ ค่าเริ่มต้นของเวกเตอร์ x และเวกเตอร์ u

$\Delta x, \Delta u$ คือ ค่าที่เลื่อนจากค่าเริ่มต้น

g, h คือ ค่าประมาณแบบเชิงเส้นของเงื่อนไขบังคับแบบสมการและอสมการตามลำดับ

2.2.4 การทำออปติมัลเพาเวอร์โพล์โดยใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

รูปแบบโดยทั่วไปของปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โพล์แบบดั้งเดิมตามชุดสมการที่ (2.32)-(2.34) เป็นการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยทำการหาค่าเหมาะที่สุดของเวกเตอร์ x และเวกเตอร์ u โดยตรง แต่ในการทำออปติมัลเพาเวอร์โพล์แบบดั้งเดิมโดยใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้น (LPOPF) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ ดังชุดสมการที่ (2.46)-(2.48) จะใช้วิธีการหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยทำการหาค่าเหมาะที่สุดของค่าที่เลื่อนจากค่าเริ่มต้นเวกเตอร์ Δx และเวกเตอร์ Δu แทน ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของปัญหาได้ดังนี้

$$\text{minimize}_{\Delta x} \left[\frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=x^k} \right] \cdot \Delta x \quad (2.49)$$

$$\text{subject to} \left[\frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{x=x^k} \right] \cdot \Delta x = -g(x^k) \quad (2.50)$$

$$\left[\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=x^k} \right] \cdot \Delta x \leq -h(x^k) \quad (2.51)$$

โดยที่ x คือ เวกเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวแปรฟังก์ชัน, พารามิเตอร์คงที่ และตัวแปรควบคุม (แทนค่า x และ u)

Δx คือ ค่าที่เลื่อนจากค่าเริ่มต้นที่ประกอบด้วยตัวแปรฟังก์ชัน, พารามิเตอร์คงที่ และตัวแปรควบคุม (แทนค่า Δx และ Δu)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังมีประโยชน์ คือ ทำให้ทราบขีดความสามารถของระบบว่ามีความสามารถรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบได้มากน้อยเพียงใด

การเปลี่ยนแปลงภายในของระบบแยกได้เป็น 2 กรณีใหญ่ ๆ คือ

- 1) การเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงโหลดที่เป็นการเพิ่มหรือลดอย่างช้า ๆ กรณีดังกล่าวการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวเป็นแบบสถิต (Static Stability)
- 2) การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวเป็นแบบชั่วคราว (Transient Stability) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงแบบชั่วคราวมาวิเคราะห์ปัญหาอุบัติเหตุลัดวงจรโพล์ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.1 เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability)

การศึกษาเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นการศึกษาขีดความสามารถของระบบว่าจะอยู่ในภาวะซิงโครไนซ์ (Synchronism) หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบอย่างทันทีทันใดได้หรือไม่ ซึ่งสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงของระบบอาจเกิดจากการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องออก การปลดสายส่งบางเส้น การเพิ่มหรือลดโหลดจำนวนมากอย่างทันทีทันใด หรือการเกิดฟอลต์ภายในระบบ จากสาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า กระแส กำลังไฟฟ้า ความเร็ว แรงบิด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบที่มีเสถียรภาพสูง คือ ระบบที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบได้โดยไม่ทำให้ไฟฟ้าดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดทำงานของระบบก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ และความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยทั่ว ๆ ไปจุดทำงานใหม่ของระบบในสภาวะอยู่ตัว (Steady State) ที่ได้หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงจะแตกต่างจากจุดทำงานเดิมก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ

โดยปกติระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพชั่วคราวในระบบไฟฟ้า จะใช้ระยะเวลาไม่เกิน 3-5 วินาที ขึ้นอยู่กับลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบ แต่ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีขนาดใหญ่ เราสามารถขยายระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาเป็น 10 วินาทีได้ [7]

3.2 เสถียรภาพแบบสวิงครั้งแรก (First Swing Stability) [11]

การศึกษาเสถียรภาพแบบสวิงครั้งแรก เป็นการศึกษาเสถียรภาพของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องในขณะเกิดภาวะชั่วคราว เราสามารถระบุได้ว่าระบบมีเสถียรภาพแบบสวิงครั้งแรกหรือไม่ โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์เทียบกับกรอบอ้างอิง COA (Center of Angle Reference Frame) ซึ่งกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.5.2

ถ้าระบบมีเสถียรภาพ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องขณะเกิดฟอลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) จนถึงจุดยอดค่าสูงสุด (หรือต่ำสุด) หลังจากนั้นมุมโรเตอร์จะวกกลับหรือมุมจะค่อยๆ ลดลง (หรือเพิ่มขึ้น) ในทางกลับกันถ้าระบบสูญเสียเสถียรภาพ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งหรือหลายเครื่องจะมีค่าเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) เพียงอย่างเดียว จนทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านั้นหลุดจากภาวะซิงโครไนซ์ เป็นผลทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ

ในเชิงคณิตศาสตร์ สามารถระบุได้ว่าระบบไฟฟ้าที่กำลังพิจารณามีเสถียรภาพแบบสวิงครั้งแรกได้จากเงื่อนไขดังนี้

$$|\delta_i(t_i + \varepsilon)| < |\delta_i(t_i)|$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง

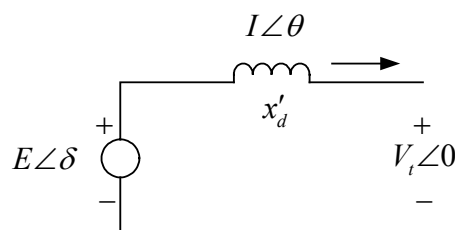
โดย t_i คือ เวลาในขณะที่มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i ถึงจุดยอด (> เวลาจำกัดฟอลต์)

ε คือ ค่าบวกจำนวนน้อย ๆ

3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ [18]

3.3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Model)

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ Classical Model ของเครื่องจักรซิงโครนัส (Synchronous Machine) ซึ่งมีแบบจำลองดังรูป

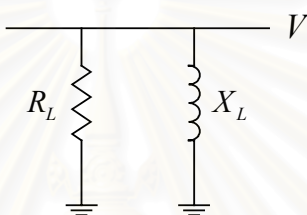


รูปที่ 3.1 แสดง Classical Model ของเครื่องจักรซิงโครนัส

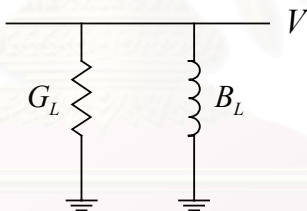
โดย	E	คือ	ขนาดของแรงดันภายในเครื่องจักรซิงโครนัส
	δ	คือ	มุมระหว่างตำแหน่งของโรเตอร์เทียบกับแรงดันขั้ว $V_t \angle 0$
	V_t	คือ	ขนาดแรงดันที่ขั้วของเครื่องจักรซิงโครนัส

3.3.2 แบบจำลองของโหลด (Load Model)

แบบจำลองของโหลดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้โหลดเป็นแบบอิมพีแดนซ์คงที่ (Static Impedance) ซึ่งมีแบบจำลองดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่



รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองของโหลดแบบแอดมิแตนซ์คงที่

เมื่อเราพิจารณาบัสที่มีแรงดัน V ซึ่งมีโหลด $P_L + jQ_L$ เชื่อมต่ออยู่ ณ นั้น เราสามารถเขียนแบบจำลองของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ดังรูปที่ 3.2 ให้อยู่ในรูปแบบจำลองของโหลดแบบแอดมิแตนซ์คงที่ (Static Admittance) ได้ โดย $G_L = P_L/V^2$ และ $B_L = Q_L/V^2$ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งค่ากำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟของโหลดจะถูกกำหนดมา ส่วนค่าแรงดัน V สามารถหาได้จากการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ

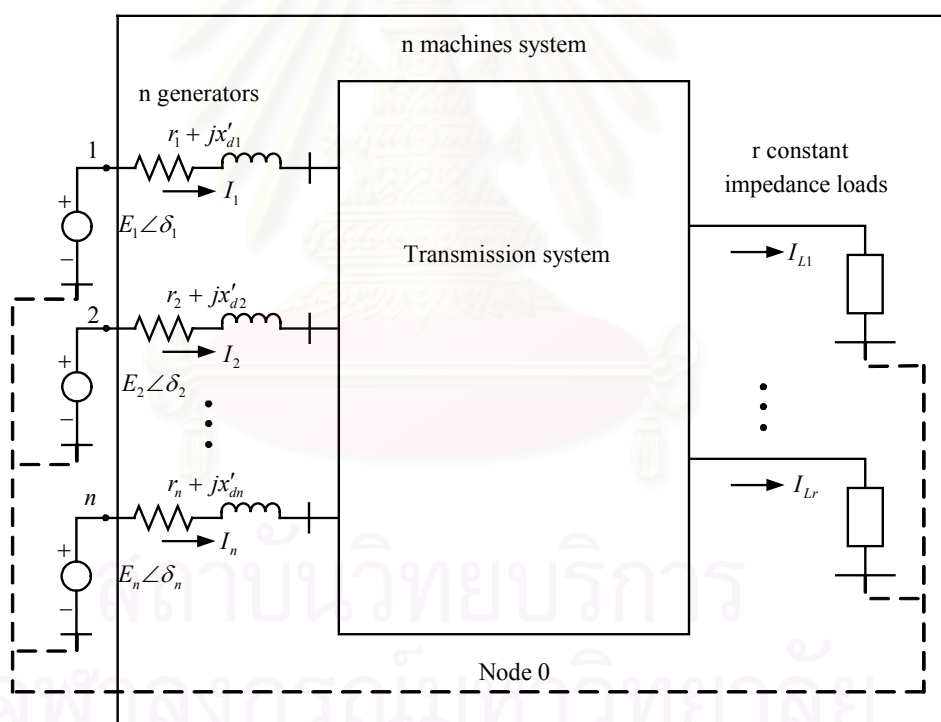
แบบจำลองของโหลดดังรูปที่ 3.3 นั้น กำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟของโหลดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แต่จะไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่บัส หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าแบบจำลองของโหลดนี้กำหนดให้ $P_L \propto V^2$ และ $Q_L \propto V^2$ ซึ่งทั้งสองค่านี้ไม่ขึ้นกับความถี่

3.3.3 แบบจำลองของระบบหลายเครื่องจักร

แบบจำลองของระบบหลายเครื่องจักรที่ใช้ในการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ Classical Model ซึ่งสมมติฐานที่ใช้ของระบบหลายเครื่องจักรมีดังนี้

- 1) กำลังทางกลด้านเข้า P_m มีค่าคงที่
- 2) ไม่รวมผลค่าการหน่วง (Damping)
- 3) เครื่องจักรซิงโครนัสถูกแทนที่ด้วยแรงดันคงที่ E หลังรีแอกแตนซ์ชั่วคราว x'_d
- 4) มุมโรเตอร์ทางกลของเครื่องจักรมีค่าเท่ากับมุมของแรงดันภายใน δ ที่อยู่หลังรีแอกแตนซ์ชั่วคราว x'_d
- 5) โหลดเป็นแบบอิมพีแดนซ์คงที่

แบบจำลองของระบบหลายเครื่องจักรแบบ Classical Model สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองของระบบหลายเครื่องจักรแบบ Classical Model

แบบจำลอง Classical Model มีประโยชน์ในการศึกษาเสถียรภาพ แต่เนื่องจากแบบจำลองนี้จัดอยู่ในรูปอย่างง่าย ทำให้มีข้อจำกัดในการศึกษา คือ สามารถใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษาเสถียรภาพชั่วคราวแบบสวิงครั้งแรกของมุมโรเตอร์ δ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น หรือระยะเวลาที่ทำการศึกษาไม่ควรเกิน 1 วินาที [18] เมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในระบบเกิดขึ้น สมมติว่าผลการเปลี่ยนแปลงนั้นทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าเร่งค่าบวกบนโรเตอร์ของเครื่องจักร ทำให้มุมโรเตอร์ของ

เครื่องจักรนั้นเพิ่มขึ้น ถ้ามุมของโรเตอร์เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆโดยไม่หยุด เครื่องจักรนั้นจะหลุดจากภาวะซิงโครไนซ์และจะสูญเสียเสถียรภาพ แต่ถ้ามุมโรเตอร์แกว่งขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุดแล้วเริ่มมีค่าลดลง ผลลัพธ์ที่ได้จะมีการแกว่งไปมาของมุมโรเตอร์โดยมีระยะการแกว่งคงที่ (เนื่องจากไม่มีค่าการหน่วง) ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าเมื่อใช้ Classical Model และสมมติฐานดังกล่าวแล้ว เราจะสามารถตัดสินใจได้ว่าระบบมีเสถียรภาพหรือไม่ โดยพิจารณาจากการสวิงครั้งแรกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การพิจารณาเสถียรภาพชั่วคราวแบบสวิงครั้งแรก (First Swing Transient Stability) โดยจะขยายระยะเวลาในการวิเคราะห์เป็น 2 วินาที เพื่อวิเคราะห์ว่าระบบมีเสถียรภาพหรือไม่ เนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอย่างชัดเจนเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบ

3.4 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ข้อมูลที่จำเป็นในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้น สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

3.4.1 ผลที่ได้จากการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์

ก่อนที่จะมีการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องทราบสถานะการจ่ายไฟฟ้าปกติของระบบก่อน ซึ่งการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ทำให้ทราบแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ของระบบ ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบ

3.4.2 วงจรสมมูลย์ของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบ

ในการศึกษานั้นเราจะจำลองอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบ เพื่อนำไปประกอบเข้าด้วยกันแทนระบบไฟฟ้าที่ต้องการพิจารณา โดยทำเป็นแบบจำลองแทนการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบ

3.4.3 สมการสวิง (Swing Equation)

สมการสวิงเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสอง (Second-order Differential Equation) แสดงความสัมพันธ์ของมุมโรเตอร์ δ และเวลา t

โดยปกติการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องทราบสถานะการจ่ายไฟฟ้าปกติของระบบเป็นอันดับแรก ซึ่งสามารถทราบได้จากการคำนวณของเพาเวอร์โฟลว์ จากนั้นจึงนำวงจรสมมูลย์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบมาจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งทำให้เราทราบสภาวะการไหลของกำลังไฟฟ้าในระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบ การเปลี่ยนแปลง

ของค่าต่างๆที่เกิดขึ้น รวมทั้งคุณสมบัติการทำงานของเครื่องจักรต่าง ๆ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย คุณสมบัติดังกล่าวสามารถแทนได้ด้วยสมการสวิง และจากการศึกษาสมการสวิงทำให้ทราบได้ว่าระบบมีเสถียรภาพหรือไม่ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อที่ 3.6

3.5 สมการสวิง (Swing Equation)

3.5.1 คุณลักษณะของสมการสวิง [5]

สมการสวิง เป็นสมการที่ได้มาจากการพิจารณาการตอบสนองทางกลของเครื่องจักรซิงโครนัส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบ สามารถให้เขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับสองได้ดังนี้

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad \text{N-m} \quad (3.1)$$

โดยที่	J	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลโรเตอร์ มีหน่วยเป็น kg-m^2
	θ_m	คือ	การกระจัดเชิงมุมของโรเตอร์เทียบกับแกนอ้างอิงอยู่กับที่บนสเตเตอร์ (Stationary Axis) มีหน่วยเป็น mechanical radians
	t	คือ	เวลา มีหน่วยเป็น seconds
	T_m	คือ	แรงบิดทางกล มีหน่วยเป็น N-m
	T_e	คือ	แรงบิดทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็น N-m

สามารถเปลี่ยนสมการที่ (3.1) ให้อยู่ในรูปกำลังไฟฟ้าได้เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณโดยการคูณด้วยความเร็วเชิงมุมทางกล ω_m ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

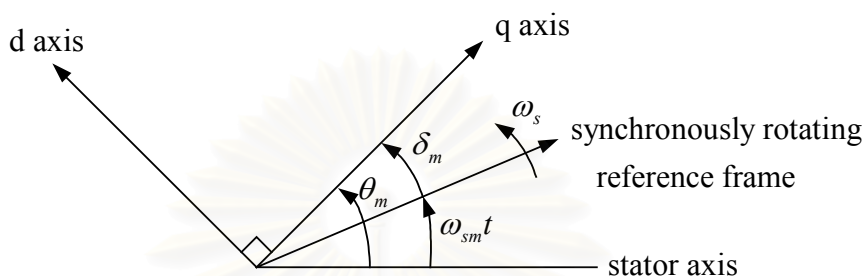
$$M \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (3.2)$$

โดยที่	M	คือ	โมเมนต์เชิงมุม มีค่าเท่ากับ $J\omega_m$
	P_m	คือ	กำลังทางกลด้านเข้า
	P_e	คือ	กำลังไฟฟ้าด้านออก

เนื่องจากการกระจัดเชิงมุมของโรเตอร์ θ_m เป็นค่าที่เทียบกับแกนอ้างอิงอยู่กับที่ (Stationary Reference Axis) บนสเตเตอร์ ดังนั้นมุม θ_m ที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆด้วยความเร็วซิงโครนัสเมื่อเทียบกับเวลา และด้วยเหตุผลที่ว่าความเร็วของโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับความเร็วซิงโครนัส ทำให้เราสามารถหาค่า θ_m ได้จาก

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad \text{mechanical radians}$$

โดยที่ ω_{sm} คือ ความเร็วเชิงโคจรของเครื่องจักร
 δ_m คือ การกระจัดเชิงมุมของโรเตอร์เทียบกับกรอบอ้างอิงหมุน (Synchronous Rotating Reference Frame)



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ของมุมต่าง ๆ เทียบกับกรอบอ้างอิงหมุน

ทำการหาค่าอนุพันธ์เทียบกับเวลา t จะได้

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (3.3)$$

และ

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3) แสดงให้เห็นว่าความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ $\frac{d\theta_m}{dt}$ มีค่าคงที่ และมีค่าเท่ากับความเร็วเชิงโคจรเมื่อ $\frac{d\delta_m}{dt}$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น $\frac{d\delta_m}{dt}$ จะแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์จากความเร็วเชิงโคจร มีหน่วยเป็น mechanical radians/sec ส่วนสมการที่ (3.4) แสดงค่าความเร่งของโรเตอร์ มีหน่วยเป็น mechanical radians/sec²

แทนค่าสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (3.5)$$

โดยปกติโมเมนต์เฉื่อย M มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากค่าความเร็วเชิงมุมทางกล ω_m มีค่าไม่คงที่ที่ความเร็วเชิงโคจรในทุกสภาพเหตุการณ์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ω_m จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วเชิงโคจรเมื่อเครื่องจักรมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดให้ M มีค่าคงที่ได้

ข้อมูลของเครื่องจักรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้น มีค่าที่เกี่ยวข้องกับความเฉื่อยเรียกว่า ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant) H มีค่าดังนี้

$$H = \frac{\text{stored kinetic energy in megajoules at synchronous speed}}{\text{machine rating in MVA}}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad \text{MJ/MVA} \quad (3.6)$$

โดยที่ ω_m คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็น mechanical radians/sec

S_{mach} คือ พิกัดของเครื่องจักร มีหน่วยเป็น MVA

จากสมการที่ (3.6) จะได้ M มีค่าเท่ากับ

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad \text{MJ/mech rad} \quad (3.7)$$

แทนค่าสมการที่ (3.7) ลงในสมการที่ (3.5) จะได้

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (3.8)$$

เราสามารถเปลี่ยนสมการที่ (3.8) ให้อยู่ในรูปต่อหน่วย (Per Unit: pu) ได้ดังนี้

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (3.9)$$

โดยที่หน่วยของ δ และ ω_s ต้องมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งมีหน่วยเป็นเรเดียนหรือองศา ทั้งทางไฟฟ้าหรือทางกลก็ได้ หน่วยของ H และ t ต้องมีความสัมพันธ์กันเนื่องจาก MJ/MVA ขึ้นกับเวลาเป็นวินาที ค่า P_m และ P_e ต้องอยู่บนฐานเดียวกันกับค่า H

มีข้อสังเกตว่าเมื่อใช้ตัวห้อย m กับ ω , ω_s และ δ หมายความว่าค่าเหล่านี้จะมีหน่วยเป็นหน่วยทางกล ถ้าไม่มีตัวห้อย m ต่อท้าย หมายความว่า เป็นหน่วยทางไฟฟ้า

จากสมการที่ (3.9) เมื่อ δ มีหน่วยเป็นเรเดียนจะได้

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (3.10)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น Hertz

เมื่อ δ มีหน่วยเป็นองศาจะได้

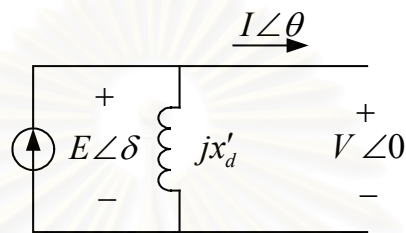
$$\frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (3.11)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการสวิงให้อยู่ในรูปสมการทั่ว ๆ ไปได้ดังนี้

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (3.12)$$

สมการสวิงเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ δ และเวลา t เมื่อนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ กราฟที่ได้จะเรียกว่า กราฟสวิง (Swing Curve)

จากแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปวงจรมุมูลย์ได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรมุมูลย์ของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จุดประสงค์ในการเปลี่ยนแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในรูปวงจรมุมูลย์คือ ต้องการหาค่า P_e ให้อยู่ในรูปแบบปิด (Closed Form) เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาเสถียรภาพ ซึ่งหาได้จาก

$$P_e = \text{Re}(V_i I_i^*) \quad (3.13)$$

โดยที่

$$I_i = \frac{1}{jx'_{di}} (E_{gi} - V_i) \quad (3.14)$$

จาก $E_{gi} = E_i \cos \delta_i + jE_i \sin \delta_i$ และ $V_i = V_{xi} + jV_{yi}$ แทนค่าลงในสมการที่ (3.14) จะได้

$$I_i = -j \frac{1}{x'_{di}} (E_i \cos \delta_i + jE_i \sin \delta_i) + j \frac{1}{x'_{di}} (V_{xi} + jV_{yi}) \quad (3.15)$$

นำสมการที่ (3.15) แทนค่าลงในสมการที่ (3.13) จะได้ค่า P_e ที่อยู่ในรูปแบบปิดดังนี้

$$P_{ei} = \frac{1}{x'_{di}} (E_i V_{xi} \sin \delta_i - E_i V_{yi} \cos \delta_i) \quad (3.16)$$

สมการที่ (3.16) เป็นสมการหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก P_e ที่อยู่ในรูปแบบปิด กล่าวคือสามารถหาค่า P_e ได้จากค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กำลังศึกษาเครื่องนั้นได้โดยตรง โดยไม่ต้องใช้ค่าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่น ๆ

แทนค่า P_e ที่อยู่ในรูปแบบปิดลงในสมการที่ (3.12) ซึ่งเป็นสมการสวิงที่หาความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ δ และเวลา t โดยเทียบกับกรอบอ้างอิงหมุน จะได้สมการสวิงอยู่ในรูป

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - \frac{1}{x'_{di}} (E_i V_{xi} \sin \delta_i - E_i V_{yi} \cos \delta_i) \quad (3.17)$$

โดยปกติเราสามารถเขียนสมการสวิงซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First-order Differential Equation) 2 สมการ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า ทำให้ได้สมการสวิงอยู่ในรูป

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \quad (3.17)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{M_i} \left[P_{mi} - \frac{1}{x'_{di}} (E_i V_{xi} \sin \delta_i - E_i V_{yi} \cos \delta_i) \right] = f_i(\delta) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.18)$$

โดยที่ δ_i คือ มุมโรเตอร์เทียบกับกรอบอ้างอิงหมุน (Synchronous Rotating Reference Frame) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

ω_i คือ ความเร็วเชิงมุมเทียบกับกรอบอ้างอิงหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

P_{mi} คือ กำลังทางกลด้านเข้าของเครื่องจักรที่ i (Shaft Power Input)

P_{ei} คือ กำลังไฟฟ้าด้านออกของเครื่องจักรที่ i (Electrical Power Output)

E_i คือ แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

M_i คือ โมเมนต์เฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

เราสามารถหาค่า V_x และ V_y ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

โดยที่ G และ B คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ Y_{BUS}

V_x และ V_y คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของแรงดันที่บัส

I_x และ I_y คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของกระแสที่ไหลเข้าบัส

ค่า I_x และ I_y หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

1) บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่

$$I_{xi} = \frac{E_i \sin \delta_i}{x'_{di}} \quad I_{yi} = -\frac{E_i \cos \delta_i}{x'_{di}} \quad (3.20)$$

2) บัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่

$$I_{xi} = 0 \quad I_{yi} = 0 \quad (3.21)$$

3.5.2 กรอบอ้างอิง COA (Center of Angle Reference Frame) [7, 19]

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้น การใช้กรอบอ้างอิง (Reference Frame) ที่เหมาะสมจะมีส่วนช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้กรอบอ้างอิง COA ในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวซึ่งมีสมการดังนี้

$$\delta_{COA} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.22)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.23)$$

โดยที่ δ_{COA} คือ มุมโรเตอร์เฉลี่ยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง
 δ_i คือ มุมโรเตอร์เทียบกับกรอบอ้างอิงหมุน (Synchronous Rotating Reference Frame) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i
 M_i คือ โมเมนต์เฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i
 M_T คือ ผลรวมของโมเมนต์เฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง

เราสามารถระบุได้ว่าระบบไฟฟ้าใดมีเสถียรภาพหรือไม่โดยดูจากมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องเทียบกับมุมโรเตอร์เฉลี่ยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง δ_{COA} ว่ามุมเหล่านั้นอยู่ในค่าที่กำหนดหรือไม่ดังสมการที่ (3.24)

$$\delta_i - \delta_{COA} \leq \delta_i^M \quad (3.24)$$

โดยที่ δ_i^M คือ ค่าของมุมโรเตอร์ที่มากที่สุดที่ระบบสามารถอยู่ในเสถียรภาพได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ δ_i^M มีค่า 100 องศา หรือมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า δ_i ทุกเครื่องเมื่อเทียบกับ δ_{COA} แล้ว สามารถแกว่งได้มากที่สุดไม่เกิน 100 องศา โดยมีเหตุผลดังนี้ [12]

- 1) ไม่มีระเบียบวิธีใด ๆ ที่สามารถระบุขอบเขตของเสถียรภาพแบบพลวัตได้ ซึ่งสมการที่ (3.24) เป็นเพียงสมการเดียวที่สามารถระบุได้
- 2) สมมติว่าสามารถแบ่งกลุ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกเป็น 2 กลุ่มในช่วงภาวะชั่วคราวเมื่อใช้หลักพื้นที่เท่ากัน (Equal Area Criterion) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้หาเสถียรภาพอย่างง่าย

ระบุได้ว่ามุมโรเตอร์สัมพันธ์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 กลุ่มจะต้องไม่เกิน 180 องศา มิฉะนั้นระบบจะสูญเสียเสถียรภาพ

- 3) โดยทั่วไป มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกินค่ามุมที่กำหนดไว้ (Threshold Angle) เช่น 100 องศา เป็นต้น ซึ่งถ้าค่ามุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดเกินค่าที่กำหนดไว้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นจะถูกปลดออกจากระบบโดยรีเลย์ที่ใช้ป้องกันการผิดจังหวะ (Out-of-step Relay) เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบ หรือเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้น

3.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้สมการสวิง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

3.6.1 หลักการพื้นที่เท่ากัน (Equal Area Criterion)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่าย ใช้เวลาในการคำนวณน้อย สามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเนื่องจากเหตุการณ์ต่างๆ ได้ง่าย แต่มีขีดจำกัดคือใช้วิเคราะห์ได้กับไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องจักรหนึ่งหรือสองตัวเท่านั้น หลักการพื้นที่เท่ากันเป็นวิธีการหาเสถียรภาพโดยการอินทิเกรตค่าผลต่างระหว่างกำลังกลด้านเข้า P_m กับกำลังไฟฟ้าด้านออก P_e และทำการอินทิเกรตตั้งแต่มุมโรเตอร์ขณะก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจนถึงมุมโรเตอร์ที่สูงสุดก่อนเกิดการสวิงกลับ ถ้าค่าที่ได้จากการอินทิเกรตมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ แต่ถ้าค่าที่ได้ไม่เท่ากับศูนย์แสดงว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ

3.6.2 วิธีการเขียนกราฟทีละขั้นตอน (Step-by-step Integration Method: SBSI)

วิธีการนี้จะทำการแบ่งเวลาออกเป็นช่วง ๆ เพื่อหาค่ามุมโรเตอร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา โดยใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Integration) ในการหาผลเฉลย วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีของออยเลอร์ (Euler Method) วิธีของออยเลอร์ที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Euler Method) วิธีของรุงเง-คูตตา (Runge-Kutta Method) เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการของรุงเง-คูตตา อันดับสี่ (Fourth-order Runge-Kutta Method) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีความเที่ยงตรงสูงและเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ประกอบกับการใช้ช่วงก้าวขนาด 0.1 วินาทีซึ่งถือว่าเป็นช่วงก้าวขนาดใหญ่ (Large Step-size) ในการคำนวณแต่ละขั้น วิธีนี้เรียกว่า Large Step-size Integration Method จากการใช้วิธีดังกล่าวจะทำให้การคำนวณมีความรวดเร็วเพิ่มขึ้นและยังคงมีความเที่ยงตรงสูงอยู่ ซึ่งวิธีนี้จะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธี Large Step-size Integration [10]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยใช้วิธีการของรุงเง-คุตตาอันดับสี่ (Fourth-order Runge-Kutta Method) ร่วมกับวิธีการหาผลเฉลยโดยใช้ช่วงก้าวขนาดใหญ่ (Large Step-size Integration Method) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

วิธีของรุงเง-คุตตาอันดับสี่จัดว่าเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีค่าความผิดพลาดในรูปแบบของความกว้างช่วงอันดับสี่ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีความเที่ยงตรงสูงทำให้วิธีนี้ถูกนำไปประยุกต์กับงานคำนวณหลายๆด้าน โดยเฉพาะในงานวิจัยที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการที่ (3.17) และ (3.18) ให้อยู่ในรูปแบบของสมการรุงเง-คุตตาอันดับสี่ได้ดังนี้

$$\delta_i(k+1) = \delta_i(k) + \frac{\Delta t}{6}(a_i(k) + 2b_i(k) + 2c_i(k) + d_i(k)) \quad (3.25)$$

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \frac{\Delta t}{6}(\alpha_i(k) + 2\beta_i(k) + 2\gamma_i(k) + \eta_i(k)) \quad (3.26)$$

โดยที่

$$a_i(k) = \omega_i(k)$$

$$b_i(k) = \omega_i(k) + \frac{\Delta t}{2}\alpha_i(k)$$

$$c_i(k) = \omega_i(k) + \frac{\Delta t}{2}\beta_i(k)$$

$$d_i(k) = \omega_i(k) + \Delta t\gamma_i(k)$$

$$\alpha_i(k) = f_i(\delta(k))$$

$$\beta_i(k) = f_i\left(\delta(k) + \frac{\Delta t}{2}a(k)\right)$$

$$\gamma_i(k) = f_i\left(\delta(k) + \frac{\Delta t}{2}b(k)\right)$$

$$\eta_i(k) = f_i(\delta(k) + \Delta tc(k))$$

เมื่อกำจัด a, b, c และ d ออก จะได้

$$\delta_i(k+1) = \delta_i(k) + \Delta t\omega_i(k) + \frac{\Delta t^2}{6}(\alpha_i(k) + \beta_i(k) + \gamma_i(k)) \quad (3.27)$$

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \frac{\Delta t}{6}(\alpha_i(k) + 2\beta_i(k) + 2\gamma_i(k) + \eta_i(k)) \quad (3.28)$$

$$t(k+1) = t(k) + \Delta t \quad (3.29)$$

โดยที่

$$\alpha_i(k) = f_i(\delta(k))$$

$$\beta_i(k) = f_i\left(\delta(k) + \frac{\Delta t}{2}\omega(k)\right)$$

$$\gamma_i(k) = f_i\left(\delta(k) + \frac{\Delta t}{2}\omega(k) + \frac{\Delta t^2}{4}\alpha(k)\right)$$

$$\eta_i(k) = f_i\left(\delta(k) + \Delta t\omega(k) + \frac{\Delta t^2}{2}\beta(k)\right) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N$$

โดยทั่วไปช่วงก้าว (Step Size) หรือในที่นี้คือ ช่วงเวลา Δt ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะต้องมีความเล็กเพียงพอที่จะทำให้ผลเฉลยมีความถูกต้องอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ซึ่งปกติจะใช้ช่วงก้าวประมาณ 0.01 วินาที แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอช่วงก้าวที่เหมาะสมกับการพิจารณาเสถียรภาพชั่วคราวแบบสวิงครั้งแรกของระบบไฟฟ้า (First Swing Transient Stability) โดยจะใช้ช่วงก้าวขนาด 0.1 วินาที ซึ่งช่วงก้าวขนาดดังกล่าวให้ผลเฉลยที่ถูกต้องอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้เช่นกัน [10] และจากข้อคิดนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าได้เร็วขึ้น โดยเวลาในการคำนวณจะลดลงจึงสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวได้อย่างรวดเร็ว

บทที่ 4

การวิเคราะห์ห่อปติมัดเพาเวอร์โพลว์ โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

การวิเคราะห์ห่อปติมัดเพาเวอร์โพลว์ (OPF) มีการกล่าวถึงครั้งแรกในช่วงทศวรรษที่ 1960 จุดประสงค์ในการคำนวณ OPF คือ หาจุดทำงานของระบบไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยการคำนวณสมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) โดยคำนึงถึงสมการเพาเวอร์โพลว์และเงื่อนไขด้านต่างๆของระบบ [3] จากการที่ OPF สามารถคำนวณและจัดการปัญหาด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic) และความมั่นคง (Security) ของระบบภายในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในขั้นตอนเดียว ทำให้นักวิจัยทั้งหลายเกิดความสนใจในการคำนวณ OPF ซึ่งในปัจจุบันนักวางแผนระบบไฟฟ้ากำลังและผู้ปฏิบัติการจ่ายไฟฟ้านิยมใช้ OPF เป็นเครื่องมือช่วยในการวางแผนระบบและการปฏิบัติการจ่ายไฟฟ้า

สิ่งสำคัญในการควบคุมระบบไฟฟ้านอกเหนือจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดอย่างเพียงพอแล้ว ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพในขณะที่จ่ายโหลดด้วย ซึ่งในการศึกษาเสถียรภาพของระบบนั้นจะรวมถึงขั้นตอนในการหาผลกระทบจากการเกิดการรบกวนต่างๆ (Disturbances) ที่เกิดจากการแกว่งของมุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส ตัวอย่างเช่น การเกิดการลัดวงจรในระบบและเกิดการหลุดของสายส่ง เป็นต้น

4.1 องค์ประกอบของ SCOPF

องค์ประกอบของการวิเคราะห์ห่อปติมัดเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (SCOPF) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ สามารถแยกออกเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ

4.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การหาค่าต่ำสุดของต้นทุนในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง ซึ่งกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามกำลังสอง (Polynomial) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{minimize } F = \sum_{i=1}^{ng} f_i(P_{gi}) \quad (4.1)$$

$$f_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2$$

โดยที่ a_i, b_i, c_i คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

4.1.2 เงื่อนไขบังคับแบบสมการ (Equality Constraints)

เซตของเงื่อนไขบังคับแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณ SCOPF มี 3 เซต คือ

1) สมการเพาเวอร์โฟลว์ (Power Flow Equations) : G_{pf}

$$P_{gi} - P_{li} - V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ii} = 0 \quad (4.2)$$

$$Q_{gi} - Q_{li} - V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + V_i^2 B_{ii} = 0 \quad (4.3)$$

สมการที่ (4.2) เป็นสมการเพาเวอร์โฟลว์ของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power Flow Equation) ส่วนสมการที่ (4.3) เป็นสมการเพาเวอร์โฟลว์ของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power Flow Equation)

2) สมการหาค่าเริ่มต้น (Initial-value Equations) : G_{iv}

ก่อนที่จะสามารถคำนวณสมการสวิงได้นั้น จะต้องมีการกำหนดค่า และหาค่าเริ่มต้น เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณสมการสวิง โดยกำหนดให้

$$\omega_i^1 = 0 \quad (4.4)$$

$$E_i V_{gi} \sin(\delta_i^1 - \theta_{gi}) - x'_{di} P_{gi} = 0 \quad (4.5)$$

$$V_{gi}^2 - E_i V_{gi} \cos(\delta_i^1 - \theta_{gi}) + x'_{di} Q_{gi} = 0 \quad (4.6)$$

สมการที่ (4.4) เป็นการกำหนดค่าความเร็วเชิงมุมเริ่มต้น ω_i^1 ที่จะใช้ในการคำนวณสมการที่ (4.5) และสมการที่ (4.6) เป็นสมการที่ใช้หาค่าแรงดันภายใน E_i และมุมโรเตอร์เริ่มต้น δ_i^1 ซึ่งมาจากความสัมพันธ์ $E_i \angle \delta_i^1 = V + jx'_d I$ โดย $I = \frac{(P - jQ)}{V}$

3) สมการสวิง (Swing Equations) : G_{sw}

$$\delta_i^{k+1} - \delta_i^k - \Delta t \delta_i^k + \frac{\Delta t^2}{6} (\alpha_i^k + \beta_i^k + \gamma_i^k) = 0 \quad (4.7)$$

$$\omega_i^{k+1} - \omega_i^k - \frac{\Delta t}{6} (\alpha_i^k + 2\beta_i^k + 2\gamma_i^k + \eta_i^k) = 0 \quad (4.8)$$

$$GV_x^{k+1} - BV_y^{k+1} - I_x^{k+1} = 0 \quad (4.9)$$

$$BV_x^{k+1} + GV_y^{k+1} - I_y^{k+1} = 0 \quad (4.10)$$

โดยที่

$$\alpha_i^k = f_i(\delta^k)$$

$$\beta_i^k = f_i\left(\delta^k + \frac{\Delta t}{2}\omega^k\right)$$

$$\gamma_i^k = f_i\left(\delta^k + \frac{\Delta t}{2}\omega^k + \frac{\Delta t^2}{4}\alpha^k\right)$$

$$\eta_i^k = f_i\left(\delta^k + \Delta t\omega^k + \frac{\Delta t^2}{2}\beta^k\right)$$

$f_i(\cdot)$ คือ สมการที่ (3.18) โดยค่าที่อยู่ในวงเล็บเป็นค่าของตัวแปรมุมโรเตอร์ที่เปลี่ยนไปตาม α_i^k , β_i^k , γ_i^k และ η_i^k

สมการที่ (4.7) และสมการที่ (4.8) เป็นสมการสวิงที่อยู่ในรูปแบบของสมการรุงง-คูตตามันดับสี่ ส่วนสมการที่ (4.9) และสมการที่ (4.10) เป็นสมการที่ใช้หาค่า V_x^{k+1} และ V_y^{k+1}

4.1.3 เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ (Inequality Constraints)

เงื่อนไขบังคับแบบอสมการที่ใช้ในการคำนวณ SCOPF มี 2 เซต คือ

- 1) เงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพ (Stability Constraints) : H_{stab}

$$\delta_i - \delta_{COA} \leq \delta_i^M \quad (4.11)$$

โดยที่

$$\delta_{COA} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i$$

อสมการที่ (4.11) จะเป็นเงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพโดยพิจารณาจากการแกว่งของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เทียบกับมุมโรเตอร์เฉลี่ยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง

- 2) เงื่อนไขบังคับทางกายภาพ (Physical Constraints) : H_{lim}

$$V_i^m \leq V_i \leq V_i^M \quad (4.12)$$

$$P_{gi}^m \leq P_{gi} \leq P_{gi}^M \quad (4.13)$$

$$Q_{gi}^m \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^M \quad (4.14)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij}^M \quad (4.15)$$

อสมการที่ (4.12) ถึงอสมการที่ (4.15) เป็นเงื่อนไขบังคับแบบอสมการที่ใช้ในการคำนวณ OPF แบบดั้งเดิม (Conventional OPF)

4.2 รูปแบบปัญหา SCOPF

ปัญหาออปติ้มัลเพาเวอร์โพลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (SCOPF) สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของปัญหาได้ดังนี้

$$\text{minimize } F \quad (4.16)$$

$$\text{subject to } G_{pf} = 0, \quad G_{iv} = 0, \quad G_{sw} = 0 \quad (4.17)$$

$$H_{stab}^m \leq H_{stab} \leq H_{stab}^M, \quad H_{lim}^m \leq H_{lim} \leq H_{lim}^M \quad (4.18)$$

4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF สามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณสมการเพาเวอร์โพลว์ และค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพชั่วคราว

ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณสมการเพาเวอร์โพลว์ และคำนวณเสถียรภาพชั่วคราว

ขั้นตอนที่ 3 : ทำให้เงื่อนไขบังคับของ OPF เป็นเชิงเส้น

ทำให้เงื่อนไขบังคับของเสถียรภาพเป็นเชิงเส้น

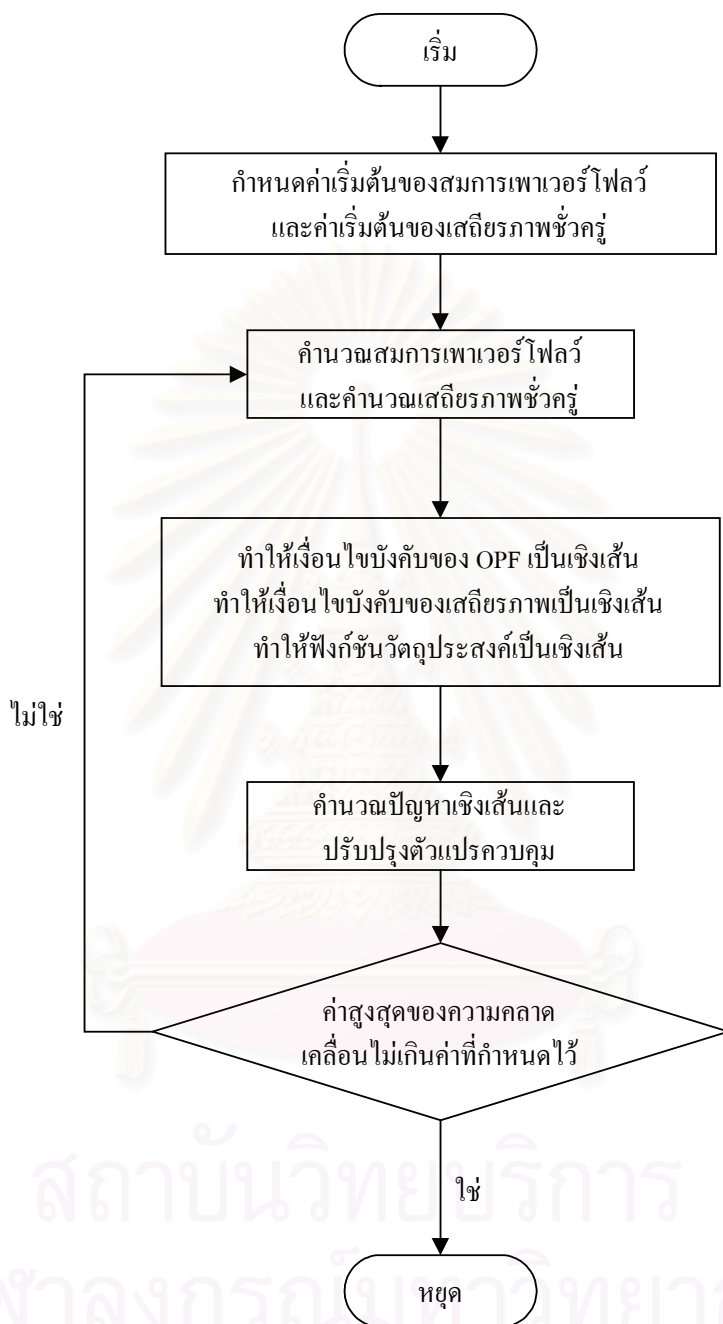
ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นเชิงเส้น

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณปัญหาเชิงเส้นและปรับปรุงตัวแปรควบคุม

ขั้นตอนที่ 5 : ถ้าค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ จบการทำงาน

ถ้าค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนเกินค่าที่กำหนดไว้ กลับไปขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF ทั้ง 5 ขั้นตอน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF ที่ได้สรุปไว้ข้างต้น สามารถอธิบายโดยละเอียดได้ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณสมการเพาเวอร์โพลว์ และค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพชั่วคราว

เราจะต้องกำหนดข้อมูลเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณสมการเพาเวอร์โพลว์ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง, ขนาดและค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, รูปแบบการต่อวงจรของระบบที่ทำการวิเคราะห์ และชนิดของบัส เป็นต้น ส่วนข้อมูลเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพชั่วคราวนั้นจะต้องทราบข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้แก่ ค่ารีแอกแตนซ์ชั่วคราว x'_d และค่าคงที่ความเฉื่อย H นอกจากนี้ต้องระบุว่า เกิดฟอลต์ขึ้นที่ตำแหน่งใด และเกิดฟอลต์เป็นระยะเวลาเท่าใดด้วย

ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณสมการเพาเวอร์โพลว์ และคำนวณเสถียรภาพชั่วคราว

เมื่อทราบข้อมูลเริ่มต้นที่ต้องการแล้ว จะนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณสมการเพาเวอร์โพลว์ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ดังที่ได้อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.3 หลังจากการคำนวณจะได้ข้อมูลสำคัญซึ่งประกอบด้วย ค่าขนาดและค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าของทุก ๆ บัส, กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการวิเคราะห์ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โพลว์ต่อไป ส่วนในการคำนวณเสถียรภาพชั่วคราวนั้น จะต้องทราบสถานะของระบบก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบ ดังนั้นจะต้องใช้ผลของการคำนวณสมการเพาเวอร์โพลว์เป็นค่าเริ่มต้นเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเสถียรภาพชั่วคราว

ขั้นตอนที่ 3 : ทำให้เงื่อนไขบังคับของ OPF, เงื่อนไขบังคับของเสถียรภาพ และฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นเชิงเส้น

จากหัวข้อที่ 2.2.4 การทำออปติมัลเพาเวอร์โพลว์โดยใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้น จะใช้วิธีการหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยทำการหาค่าเหมาะที่สุดของค่าที่เลื่อนจากค่าเริ่มต้นเวกเตอร์ Δx และเวกเตอร์ Δu แทน ดังนั้นจะต้องทำการหาค่า $\frac{\partial F}{\partial x}$, $\frac{\partial g}{\partial x}$, $\frac{\partial h}{\partial x}$, $g(x)$ และ $h(x)$ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณปัญหาเชิงเส้นและปรับปรุงตัวแปรควบคุม

นำค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ซึ่งทำให้เป็นเชิงเส้นแล้วไปคำนวณโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น หลังจากทีคำนวณแล้วจะได้ค่า Δx ค่าใหม่ และค่าตัวคูณลากรอง (Lagrange Multipliers) λ และ μ ออกมา จากนั้นนำค่า Δx ที่ได้ไปปรับปรุงตัวแปรควบคุมโดย $\mathbf{x} = \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}$

ขั้นตอนที่ 5 : ถ้าค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ จบการทำงาน
ถ้าค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนเกินค่าที่กำหนดไว้ กลับไปขั้นตอนที่ 2
ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนสุดท้ายใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไขการออกจากการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 ค่า คือ

1) เงื่อนไขจำเป็นของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} < 1 \times 10^{-3}$$

2) ความคลาดเคลื่อนของเงื่อนไขบังคับแบบสมการและอสมการ

$$\text{Max}[G(\mathbf{x})] < 1 \times 10^{-3}$$

3) ความคลาดเคลื่อนของตัวแปร $\Delta \mathbf{x}$

$$\text{Max}(\Delta \mathbf{x}) < 1 \times 10^{-3}$$

เมื่อนำค่าที่ได้มาตรวจสอบแล้วได้ว่า ถ้าค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ให้จบการทำงาน แต่ถ้าค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนเกินค่าที่กำหนดไว้ กลับไปขั้นตอนที่ 2

4.4 รูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหา SCOPF

จากขั้นตอนที่ 3 ในหัวข้อที่แล้ว ในการวิเคราะห์ปัญหา SCOPF โดยใช้การโปรแกรมแบบเชิงเส้นนั้นจะต้องทำการปรับเปลี่ยนปัญหาให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linearization) ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของปัญหาดังชุดสมการที่ (2.49)-(2.51) ดังต่อไปนี้

$$\underset{\Delta \mathbf{x}}{\text{minimize}} \quad \left[\frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k} \right] \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (2.49)$$

$$\text{subject to} \quad \left[\frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k} \right] \cdot \Delta \mathbf{x} = -g(\mathbf{x}^k) \quad (2.50)$$

$$\left[\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k} \right] \cdot \Delta \mathbf{x} \leq -h(\mathbf{x}^k) \quad (2.51)$$

4.4.1 ค่า x และ Δx

ค่า x และ Δx ที่ใช้ใน SCOPF มีค่าดังนี้

$$\begin{array}{c}
 \theta \\
 V \\
 P_g \\
 Q_g \\
 E \\
 \delta^1 \\
 \delta^k \\
 \delta^{k+1} \\
 \vdots \\
 \delta^{kend} \\
 \omega^1 \\
 \omega^k \\
 \omega^{k+1} \\
 \vdots \\
 \omega^{kend} \\
 V_x^k \\
 V_x^{k+1} \\
 \vdots \\
 V_x^{kend} \\
 V_y^k \\
 V_y^{k+1} \\
 \vdots \\
 V_x^{kend}
 \end{array}
 \mathbf{x} =
 \begin{array}{c}
 \Delta\theta \\
 \Delta V \\
 \Delta P_g \\
 \Delta Q_g \\
 \Delta E \\
 \Delta\delta^1 \\
 \Delta\delta^k \\
 \Delta\delta^{k+1} \\
 \vdots \\
 \Delta\delta^{kend} \\
 \Delta\omega^1 \\
 \Delta\omega^k \\
 \Delta\omega^{k+1} \\
 \vdots \\
 \Delta\omega^{kend} \\
 \Delta V_x^k \\
 \Delta V_x^{k+1} \\
 \vdots \\
 \Delta V_x^{kend} \\
 \Delta V_y^k \\
 \Delta V_y^{k+1} \\
 \vdots \\
 \Delta V_x^{kend}
 \end{array}
 \Delta\mathbf{x} =
 \tag{4.19}$$

4.4.2 ค่า $\frac{\partial F}{\partial x}$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วน (Partial Differentiation) ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F เทียบกับตัวแปร x หรือ ทำการหาค่า $\frac{\partial F}{\partial x}$ เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้นั้นเป็นการหาค่าต่ำที่สุดของต้นทุนการผลิตซึ่งขึ้นกับค่าตัวแปร P_g เพียงตัวแปรเดียว ดังนั้นจะได้

$$\frac{\partial F}{\partial P_g} = b_i + 2c_i P_{gi}
 \tag{4.20}$$

เมื่อได้ค่า $\frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}}$ แล้ว ทำการแทนค่า $\mathbf{x} = \mathbf{x}^k$ จะได้ค่า $\left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$ เพื่อที่จะนำไปคำนวณโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นเป็นขั้นตอนต่อไป

4.4.3 ค่า $\frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}}$ และ $\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}}$

ก่อนที่จะทำการหาค่า $\frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}}$ และ $\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}}$ จะต้องทำการจัดรูปเซตของเงื่อนไขบังคับแบบสมการและอสมการให้พจน์ที่อยู่ทางขวามือเท่ากับศูนย์ หรืออยู่ในรูป $AX - b \leq 0$ ก่อน ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$P_g - P_l - P(V, \theta) = 0 \quad (4.21)$$

$$Q_g - Q_l - Q(V, \theta) = 0 \quad (4.22)$$

$$\omega_i^1 = 0 \quad (4.23)$$

$$E_i V_{gi} \sin(\delta_i^1 - \theta_{gi}) - x'_{di} P_{gi} = 0 \quad (4.24)$$

$$V_{gi}^2 - E_i V_{gi} \cos(\delta_i^1 - \theta_{gi}) + x'_{di} Q_{gi} = 0 \quad (4.25)$$

$$\delta_i^{k+1} - \delta_i^k - \Delta t \delta_i^k + \frac{\Delta t^2}{6} (\alpha_i^k + \beta_i^k + \gamma_i^k) = 0 \quad (4.26)$$

$$\omega_i^{k+1} - \omega_i^k - \frac{\Delta t}{6} (\alpha_i^k + 2\beta_i^k + 2\gamma_i^k + \eta_i^k) = 0 \quad (4.27)$$

$$GW_x^{k+1} - BW_y^{k+1} - I_x^{k+1} = 0 \quad (4.28)$$

$$BW_x^{k+1} + GW_y^{k+1} - I_y^{k+1} = 0 \quad (4.29)$$

$$\delta_i^k - \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i^k - \delta^M \leq 0 \quad (4.30)$$

$$V_i^m - V_i \leq 0 \quad (4.31)$$

$$V_i - V_i^M \leq 0 \quad (4.32)$$

$$P_{gi}^m - P_{gi} \leq 0 \quad (4.33)$$

$$P_{gi} - P_{gi}^M \leq 0 \quad (4.34)$$

$$Q_{gi}^m - Q_{gi} \leq 0 \quad (4.35)$$

$$Q_{gi} - Q_{gi}^M \leq 0 \quad (4.36)$$

$$S_{ij}^f(V, \theta) - S_{ij}^M \leq 0 \quad (4.37)$$

$$S_{ij}^t(V, \theta) - S_{ij}^M \leq 0 \quad (4.38)$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.21) และสมการที่ (4.22) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial P}{\partial x}$ และ $\frac{\partial Q}{\partial x}$ แต่เนื่องจากสมการที่ (4.21) และสมการที่ (4.22) ได้มาจาก

$$S = \text{diag}(V) \times I^*$$

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = \text{diag}(V) \times \frac{\partial I^*}{\partial \theta} + \text{diag}(I^*) \times \frac{\partial V}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial S}{\partial V} = \text{diag}(V) \times \frac{\partial I^*}{\partial V} + \text{diag}(I^*) \times \frac{\partial V}{\partial V}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า $\frac{\partial P}{\partial x}$ ได้จาก

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \text{Re} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \text{Re} \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial P_g} = -I$$

และสามารถหาค่า $\frac{\partial Q}{\partial x}$ ได้จาก

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} = \text{Im} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} \right)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \text{Im} \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial Q_g} = -I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.23) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial G_{iv1}}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial G_{iv1}}{\partial \omega^1} = I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.24) เทียบกับตัวแปร \mathbf{x} หรือหาค่า $\frac{\partial G_{iv2}}{\partial \mathbf{x}}$ จะได้

$$\frac{\partial G_{iv2}}{\partial \theta} = -diag [EV \cos(\delta^1 - \theta)]$$

$$\frac{\partial G_{iv2}}{\partial V} = diag [E \sin(\delta^1 - \theta)]$$

$$\frac{\partial G_{iv2}}{\partial P_g} = -diag (x'_d)$$

$$\frac{\partial G_{iv2}}{\partial E} = diag [V \sin(\delta^1 - \theta)]$$

$$\frac{\partial G_{iv2}}{\partial \delta^1} = diag [EV \cos(\delta^1 - \theta)]$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.25) เทียบกับตัวแปร \mathbf{x} หรือหาค่า $\frac{\partial G_{iv3}}{\partial \mathbf{x}}$ จะได้

$$\frac{\partial G_{iv3}}{\partial \theta} = -diag [EV \sin(\delta^1 - \theta)]$$

$$\frac{\partial G_{iv3}}{\partial V} = diag [2V - E \cos(\delta^1 - \theta)]$$

$$\frac{\partial G_{iv3}}{\partial Q_g} = diag (x'_d)$$

$$\frac{\partial G_{iv3}}{\partial E} = -diag [V \cos(\delta^1 - \theta)]$$

$$\frac{\partial G_{iv3}}{\partial \delta^1} = diag [EV \sin(\delta^1 - \theta)]$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.26) เทียบกับตัวแปร \mathbf{x} หรือหาค่า $\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \mathbf{x}}$ จะได้

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial P_g} = -\frac{\Delta t^2}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial P_g} + \frac{\partial \beta^k}{\partial P_g} + \frac{\partial \gamma^k}{\partial P_g} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial E} = -\frac{\Delta t^2}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial E} + \frac{\partial \beta^k}{\partial E} + \frac{\partial \gamma^k}{\partial E} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \delta^k} = -I - \frac{\Delta t^2}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial \delta^k} + \frac{\partial \beta^k}{\partial \delta^k} + \frac{\partial \gamma^k}{\partial \delta^k} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \delta^{k+1}} = I$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \omega^k} = -\Delta t I$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial V_x^k} = -\frac{\Delta t^2}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial V_x^k} + \frac{\partial \beta^k}{\partial V_x^k} + \frac{\partial \gamma^k}{\partial V_x^k} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial V_y^k} = -\frac{\Delta t^2}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial V_y^k} + \frac{\partial \beta^k}{\partial V_y^k} + \frac{\partial \gamma^k}{\partial V_y^k} \right)$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.27) เทียบกับตัวแปร \mathbf{x} หรือหาค่า $\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \mathbf{x}}$ จะได้

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial P_g} = -\frac{\Delta t}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial P_g} + 2 \frac{\partial \beta^k}{\partial P_g} + 2 \frac{\partial \gamma^k}{\partial P_g} + \frac{\partial \eta^k}{\partial P_g} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial E} = -\frac{\Delta t}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial E} + 2 \frac{\partial \beta^k}{\partial E} + 2 \frac{\partial \gamma^k}{\partial E} + \frac{\partial \eta^k}{\partial E} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \delta^k} = -\frac{\Delta t}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial \delta^k} + 2 \frac{\partial \beta^k}{\partial \delta^k} + 2 \frac{\partial \gamma^k}{\partial \delta^k} + \frac{\partial \eta^k}{\partial \delta^k} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \omega^k} = -I$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \omega^{k+1}} = I$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial V_x^k} = -\frac{\Delta t}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial V_x^k} + 2 \frac{\partial \beta^k}{\partial V_x^k} + 2 \frac{\partial \gamma^k}{\partial V_x^k} + \frac{\partial \eta^k}{\partial V_x^k} \right)$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial V_y^k} = -\frac{\Delta t}{6} \left(\frac{\partial \alpha^k}{\partial V_y^k} + 2 \frac{\partial \beta^k}{\partial V_y^k} + 2 \frac{\partial \gamma^k}{\partial V_y^k} + \frac{\partial \eta^k}{\partial V_y^k} \right)$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.28) เทียบกับตัวแปร \mathbf{x} หรือหาค่า $\frac{\partial G_{sw3}}{\partial \mathbf{x}}$ จะได้

$$\frac{\partial G_{sw3}}{\partial V} = \text{diag} \left[\left(-\frac{2P_l}{V^3} \right) V_x^{k+1} - \left(\frac{2Q_l}{V^3} \right) V_y^{k+1} \right]$$

$$\frac{\partial G_{sw3}}{\partial E} = \text{diag} \left[-\frac{\sin \delta^{k+1}}{x'_d} \right]$$

$$\frac{\partial G_{sw3}}{\partial \delta^{k+1}} = -diag \left[\frac{E \cos \delta^{k+1}}{x'_d} \right]$$

$$\frac{\partial G_{sw3}}{\partial V_x^k} = G$$

$$\frac{\partial G_{sw3}}{\partial V_y^k} = -B$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนสมการที่ (4.29) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial G_{sw4}}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial G_{sw4}}{\partial V} = diag \left[\left(-\frac{2P_l}{V^3} \right) V_x^{k+1} + \left(\frac{2Q_l}{V^3} \right) V_y^{k+1} \right]$$

$$\frac{\partial G_{sw4}}{\partial E} = diag \left[\frac{\cos \delta^{k+1}}{x'_d} \right]$$

$$\frac{\partial G_{sw4}}{\partial \delta^{k+1}} = -diag \left[\frac{E \sin \delta^{k+1}}{x'_d} \right]$$

$$\frac{\partial G_{sw4}}{\partial V_x^k} = B$$

$$\frac{\partial G_{sw4}}{\partial V_y^k} = G$$

แต่เนื่องจากเซตของสมการสวิง G_{sw} สมการที่ (4.26) ถึงสมการที่ (4.29) จะต้องใช้วิธีทำซ้ำ (Iteration) เพราะใช้วิธีการคำนวณของแรง-กุดตาอันดับสี่ และต้องหาค่าความสัมพันธ์ของเซตของสมการสวิง G_{sw} ในทุกขั้นเวลา (Time Step) ประกอบกับถ้าระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น เช่น เกิดฟอลต์ขึ้นที่สายส่ง หรือเกิดการเคลียร์ฟอลต์พร้อมกับสายส่งหลุดออก ทำให้แรงดันในระบบเปลี่ยนไป แต่ค่ามุมโรเตอร์ δ^{k+1} และค่าความเร็วเชิงมุม ω^{k+1} จะต้องมีค่าเท่าเดิม ทำให้เขียนสมการที่ (4.26) และสมการที่ (4.27) ได้ใหม่ดังนี้

$$\delta_i^{k+1} - \delta_i^k = 0 \quad (4.39)$$

$$\omega_i^{k+1} - \omega_i^k = 0 \quad (4.40)$$

จากสมการที่ (4.39) และสมการที่ (4.40) แสดงว่าค่ามุมโรเตอร์และค่าความเร็วเชิงมุม ณ รอบที่ k และ $k+1$ มีค่าเท่ากัน ดังนั้นในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบขึ้นนั้น ค่า $\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \mathbf{x}}$

และ $\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \mathbf{x}}$ มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial P_g} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial E} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \delta^k} = -I$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \delta^{k+1}} = I$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial \omega^k} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial V_x^k} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw1}}{\partial V_y^k} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial P_g} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial E} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \delta^k} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \omega^k} = -I$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial \omega^{k+1}} = I$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial V_x^k} = 0$$

$$\frac{\partial G_{sw2}}{\partial V_y^k} = 0$$



ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนอสมการที่ (4.30) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial \delta_{stab}}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial \delta_{stab}}{\partial \delta^k} = \left(1 - \frac{M_i}{M_T}\right) I$$

และทำการหาค่า $\frac{\partial \delta_{stab}}{\partial \delta^k}$ ในทุกชั้นเวลา ตั้งแต่ $k=1, 2, \dots, kend$ เพราะต้องทำการควบคุมมอเตอร์ในทุกชั้นเวลาไม่ให้เกินค่ามมโรเตอร์ที่กำหนดไว้ δ^M

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนอสมการที่ (4.31) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial V_{lim}^m}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial V_{lim}^m}{\partial V} = -I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนอสมการที่ (4.32) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial V_{lim}^M}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial V_{lim}^M}{\partial V} = I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนอสมการที่ (4.33) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial P_{glim}^m}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial P_{glim}^m}{\partial P_g} = -I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนอสมการที่ (4.34) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial P_{glim}^M}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial P_{glim}^M}{\partial P_g} = I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนอสมการที่ (4.35) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial Q_{glim}^m}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial Q_{glim}^m}{\partial Q_g} = -I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนอสมการที่ (4.36) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial Q_{g\text{lim}}^M}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial Q_{g\text{lim}}^M}{\partial Q_g} = I$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนและใช้กฎลูกโซ่ (Chain Rule) กับอสมการที่ (4.37) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial S_{ij}^f}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial S_{ij}^f}{\partial \theta} = \frac{\partial S_{ij}^f}{\partial P^f} \times \frac{\partial P^f}{\partial \theta} + \frac{\partial S_{ij}^f}{\partial Q^f} \times \frac{\partial Q^f}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial S_{ij}^f}{\partial V} = \frac{\partial S_{ij}^f}{\partial P^f} \times \frac{\partial P^f}{\partial V} + \frac{\partial S_{ij}^f}{\partial Q^f} \times \frac{\partial Q^f}{\partial V}$$

ทำการหาอนุพันธ์แยกส่วนและใช้กฎลูกโซ่ (Chain Rule) กับอสมการที่ (4.38) เทียบกับตัวแปร x หรือหาค่า $\frac{\partial S_{ij}^t}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial S_{ij}^t}{\partial \theta} = \frac{\partial S_{ij}^t}{\partial P^t} \times \frac{\partial P^t}{\partial \theta} + \frac{\partial S_{ij}^t}{\partial Q^t} \times \frac{\partial Q^t}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial S_{ij}^t}{\partial V} = \frac{\partial S_{ij}^t}{\partial P^t} \times \frac{\partial P^t}{\partial V} + \frac{\partial S_{ij}^t}{\partial Q^t} \times \frac{\partial Q^t}{\partial V}$$

ส่วนค่า $\frac{\partial g}{\partial x}$ และ $\frac{\partial h}{\partial x}$ อื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้แสดงไว้ข้างต้นจะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด

เมื่อได้ค่า $\frac{\partial g}{\partial x}$ และ $\frac{\partial h}{\partial x}$ แล้วทำการแทนค่า $x = x^k$ จะได้ค่า $\left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{x=x^k}$ และ $\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=x^k}$ เพื่อ

ที่จะนำไปคำนวณโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นเป็นขั้นตอนต่อไป

4.4.4 ค่า $g(\mathbf{x})$ และ $h(\mathbf{x})$

ค่า $g(\mathbf{x})$ ในสมการที่ (4.21) จะเป็นค่าผลต่างของกำลังแอกทีฟ (Active Power Mismatch) ส่วนค่า $g(\mathbf{x})$ ในสมการที่ (4.22) จะเป็นค่าผลต่างของกำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power Mismatch) ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้จะป็นค่าในทำนองเดียวกันกับค่าผลต่างที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพล์แบบนิวตัน-ราฟสันที่ได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในบทที่ 2 สามารถแสดงได้ดังนี้

ค่า $g(\mathbf{x})$ โดยแทนค่า $\mathbf{x} = \mathbf{x}^k$ ในส่วนของสมการที่ (4.21) และสมการที่ (4.22) มีค่าดังนี้

$$g(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} P_{calc} - P_{spec} \\ Q_{calc} - Q_{spec} \end{bmatrix}$$

จากนั้นสามารถหาค่า $g(\mathbf{x})$ และ $h(\mathbf{x})$ โดยแทนค่า $\mathbf{x} = \mathbf{x}^k$ ลงในสมการที่ (4.23) ถึงสมการที่ (4.38)

ค่า $g(\mathbf{x}^k)$ และ $h(\mathbf{x}^k)$ ทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์เดียวกันได้ดังนี้

$$G(\mathbf{x}^k) = \begin{bmatrix} g(\mathbf{x}^k) \\ h(\mathbf{x}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{calc} - P_{spec} \\ Q_{calc} - Q_{spec} \\ \omega_i^1 \\ E_i V_{gi} \sin(\delta_i^1 - \theta_{gi}) - x'_{di} P_{gi} \\ V_{gi}^2 - E_i V_{gi} \cos(\delta_i^1 - \theta_{gi}) + x'_{di} Q_{gi} \\ \delta_i^{k+1} - \delta_i^k - \Delta t \delta_i^k + \frac{\Delta t^2}{6} (\alpha_i^k + \beta_i^k + \gamma_i^k) \\ \omega_i^{k+1} - \omega_i^k - \frac{\Delta t}{6} (\alpha_i^k + 2\beta_i^k + 2\gamma_i^k + \eta_i^k) \\ GW_x^{k+1} - BW_y^{k+1} - I_x^{k+1} \\ BW_x^{k+1} + GW_y^{k+1} - I_y^{k+1} \\ \delta_i^k - \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i^k - \delta^M \\ V_i^m - V_i \\ V_i - V_i^M \\ P_{gi}^m - P_{gi} \\ P_{gi} - P_{gi}^M \\ Q_{gi}^m - Q_{gi} \\ Q_{gi} - Q_{gi}^M \\ S_{ij}^f - S_{ij}^M \\ S_{ij}^t - S_{ij}^M \end{bmatrix}$$

แต่เนื่องจากเซตของสมการสวิงแถวที่ 6-9 ของเวกเตอร์ $G(\mathbf{x}^k)$ จะต้องใช้วิธีทำซ้ำ (Iteration) เช่นเดียวกับการหาค่าเกรเดียนต์ $\frac{\partial G_{sw}}{\partial \mathbf{x}}$ เพราะใช้วิธีการคำนวณของรุงเง-คุดตาอันดับลี และต้องการค่าความสัมพันธ์ของเซตของสมการสวิง G_{sw} ในทุกขั้นเวลา (Time Step) ประกอบกับ ถ้ำระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น เช่น เกิดฟอลต์ขึ้นที่สายส่ง หรือเกิดการเคลียร์ฟอลต์พร้อมกับสายส่งหลุดออก ทำให้แรงดันในระบบเปลี่ยนไป แต่ค่ามุมโรเตอร์ δ^{k+1} และค่าความเร็วเชิงมุม ω^{k+1} จะต้องมีค่าเท่าเดิม ทำให้เขียนสวิงแถวที่ 6 และ 7 ของเวกเตอร์ $G(\mathbf{x}^k)$ ได้ใหม่ดังนี้

$$G(\mathbf{x}^k) \text{ แถวที่ 6} = \delta_i^{k+1} - \delta_i^k$$

$$G(\mathbf{x}^k) \text{ แถวที่ 7} = \omega_i^{k+1} - \omega_i^k$$

ส่วนในแถวที่ 10 ของเวกเตอร์ $G(\mathbf{x}^k)$ จะทำการวนซ้ำหาค่ามุมโรเตอร์ในทุกขั้นเวลา ตั้งแต่ $k=1, 2, \dots, kend$ เพราะต้องทำการควบคุมมุมโรเตอร์ในทุกขั้นเวลาไม่ให้เกินค่ามุมโรเตอร์ที่กำหนดไว้ δ^M

เมื่อได้ค่า $G(\mathbf{x}^k)$ ที่สมบูรณ์แล้ว จะนำไปคำนวณโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นเป็นขั้นตอนต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะแสดงผลการทดสอบที่ได้จากการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพล์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยระบบทดสอบที่นำมาใช้คือ ระบบขนาด 9 บัส และระบบขนาด 39 บัส ตามลำดับ ในแต่ละระบบจะทดสอบโดยใช้การคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพล์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เปรียบเทียบผลกับการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพล์แบบดั้งเดิม โดยเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและเสถียรภาพของระบบที่ได้จากทั้งสองวิธี และวิเคราะห์ผล

โปรแกรมการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โพล์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการคำนวณในกรณีที่เกิดฟอลต์แบบสามเฟสลงดินที่สายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งในระบบ และถูกเคลียร์ฟอลต์ด้วยการปลดสายส่งเส้นนั้นออก โดยจะต้องระบุระยะเวลาที่ใช้ในการเคลียร์ฟอลต์ด้วย

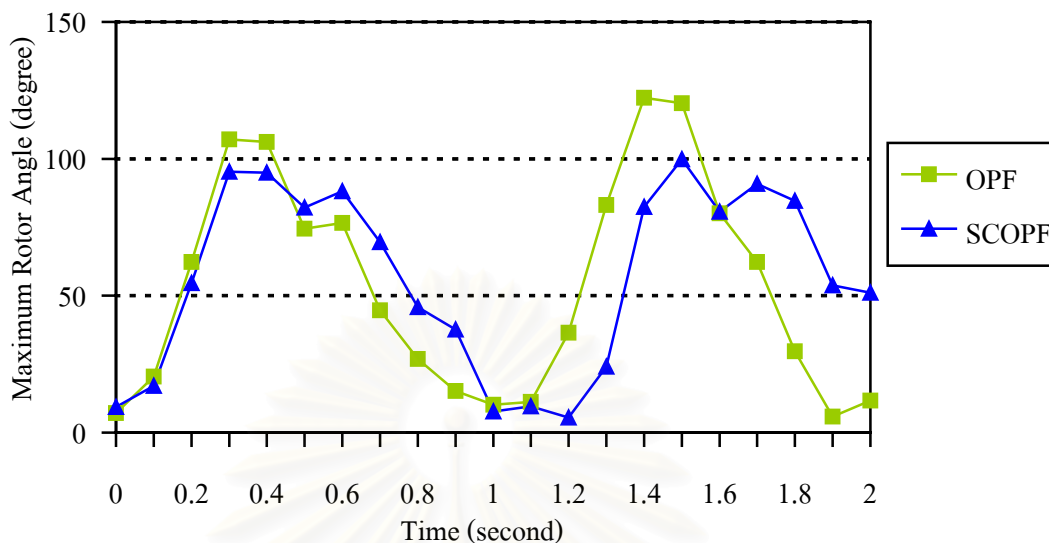
5.1 ระบบขนาด 9 บัส

ระบบทดสอบที่ใช้นี้เป็นระบบ 9 บัส ซึ่งประกอบไปด้วยบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 บัส บัสที่มีโหลด 3 บัส และสายส่งจำนวน 9 เส้น ดังแสดงในภาคผนวก ก

5.1.1 กรณีศึกษาที่ 1

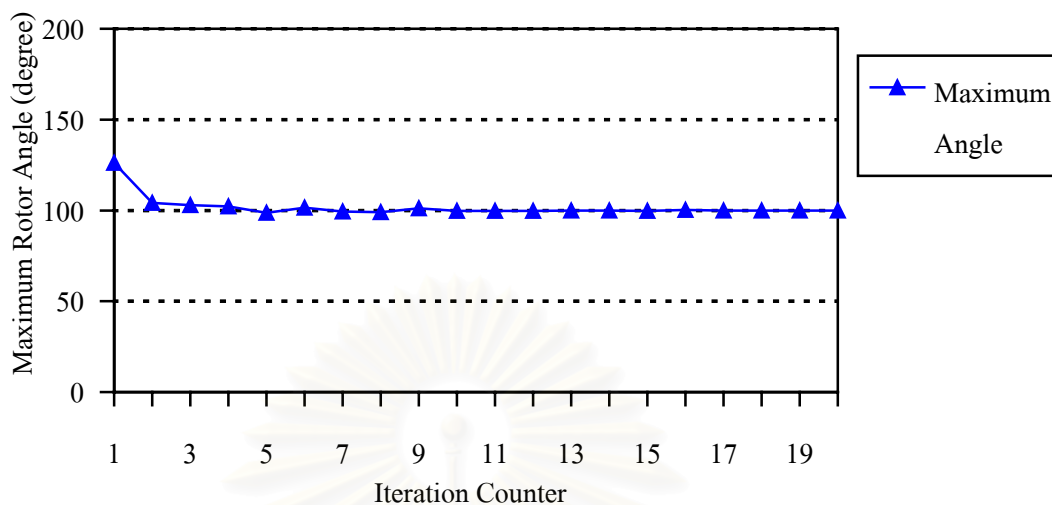
ในระบบขนาด 9 บัสนี้ สมมติให้เกิดฟอลต์แบบสามเฟสลงดินที่บัสที่ 9 และใช้ระยะเวลาในการเคลียร์ฟอลต์ 0.22 วินาที พร้อมกับปลดสายส่ง 9-6 ออก จะได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



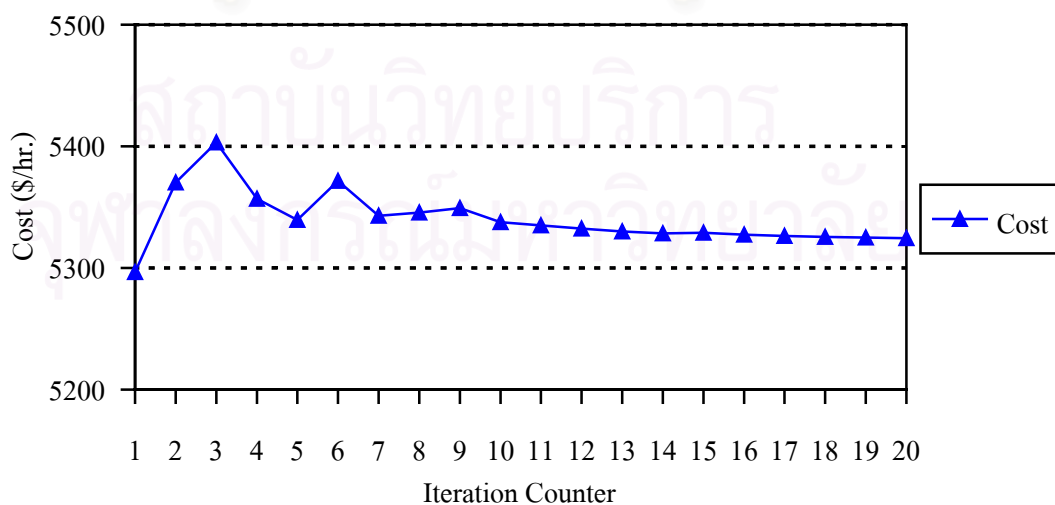
รูปที่ 5.1 แสดงผลตอบของระบบขนาด 9 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF

จากรูปที่ 5.1 สามารถสังเกตได้ว่าค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ OPF จะมีการแกว่งของมุมโรเตอร์ที่มากกว่าค่าขอบเขตของมุมที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ โดยในที่นี้เท่ากับ 100 องศาอยู่ 2 ช่วง คือในช่วง 0.3-0.4 วินาที และในช่วง 1.4-1.5 วินาที ผลที่ตามมาทำให้รีเลย์ที่ใช้ป้องกันการผิดปกติทำงานโดยการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สูญเสียเสถียรภาพออกจากระบบ โดยในที่นี้จะถือว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีใดเกิดขึ้น ส่วนค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ SCOPF นั้นจะมีค่าไม่เกิน 100 องศา ซึ่งเป็นผลมาจากการที่รวมข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพเข้าไปในการคำนวณ OPF ด้วย ทำให้ระบบสามารถทำงานอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพแม้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีใดในระบบเกิดขึ้น



รูปที่ 5.2 แสดงค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส

จากรูปที่ 5.2 สามารถสังเกตได้ว่าค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระหว่างการคำนวณ SCOPF นั้นจะถูกควบคุมให้มีค่ามุมโรเตอร์ไม่เกิน 100 องศา โดยมุมโรเตอร์ในรอบการคำนวณที่ 1 นั้นเป็นมุมโรเตอร์เริ่มต้นที่นำมาคำนวณใน SCOPF จากนั้นจะทำการคำนวณโดยวิธีวนซ้ำทำการปรับปรุงค่ามุมโรเตอร์ไปเรื่อย ๆ จนมีค่ามุมโรเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 100 องศา

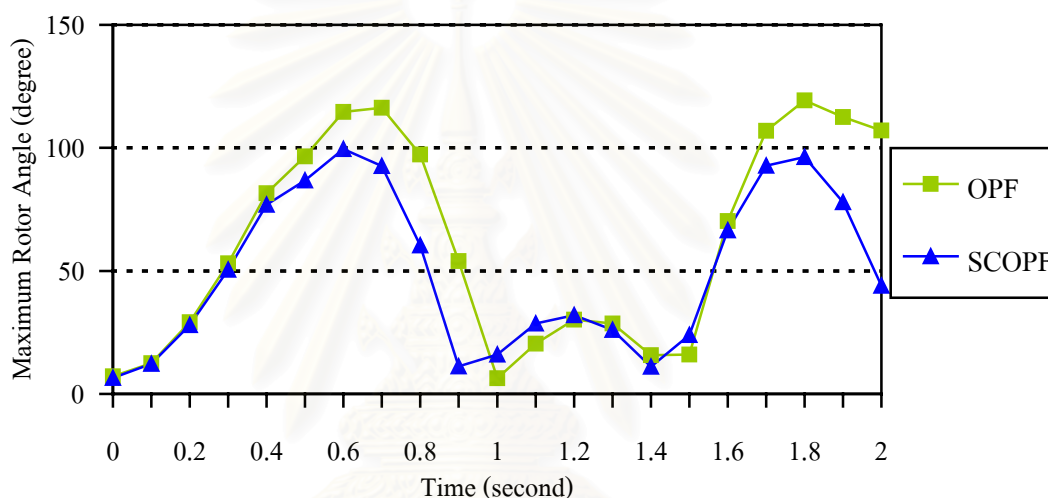


รูปที่ 5.3 แสดงค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส

จากรูปที่ 5.3 สามารถสังเกตได้ว่าค่าต้นทุนในการผลิตที่ได้จากการคำนวณ SCOPF จะมีค่าสูงกว่าค่าต้นทุนในการผลิตจากการคำนวณ OPF เนื่องจากเหตุการณ์สมมติที่นำมาทดสอบผลการคำนวณ SCOPF นั้น จะทำให้มีเงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพมีผล (Active Constraint) กล่าวคือ ทำให้ระบบมีข้อจำกัดมากขึ้น จึงทำให้ต้นทุนการผลิตจึงมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย

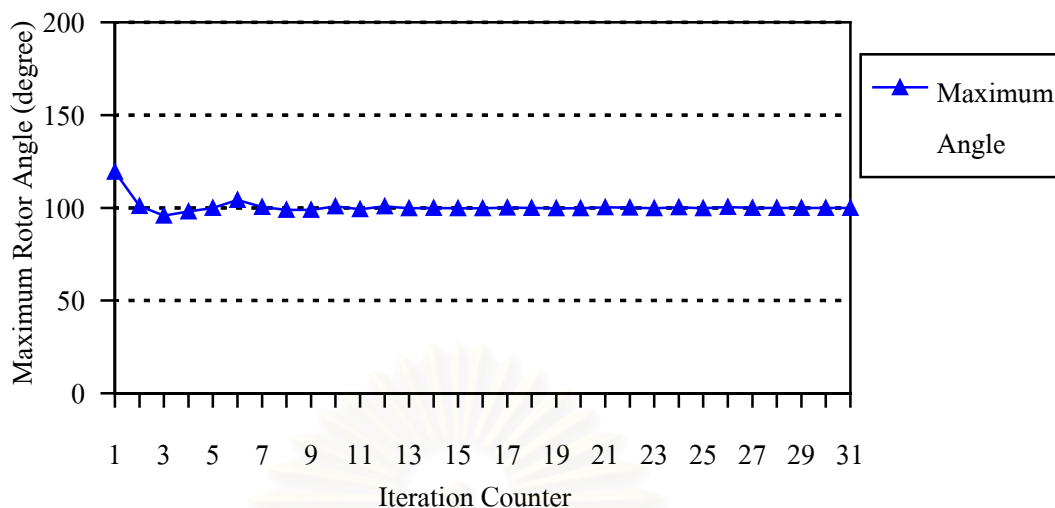
5.1.2 กรณีศึกษาที่ 2

ในระบบขนาด 9 บัสนี้ สมมติให้เกิดฟลัดด์แบบสามเฟสลงดินที่บัสที่ 4 และใช้ระยะเวลาในการเคลียร์ฟลัดด์ 0.4 วินาที พร้อมกับปลดสายส่ง 4-5 ออก จะได้



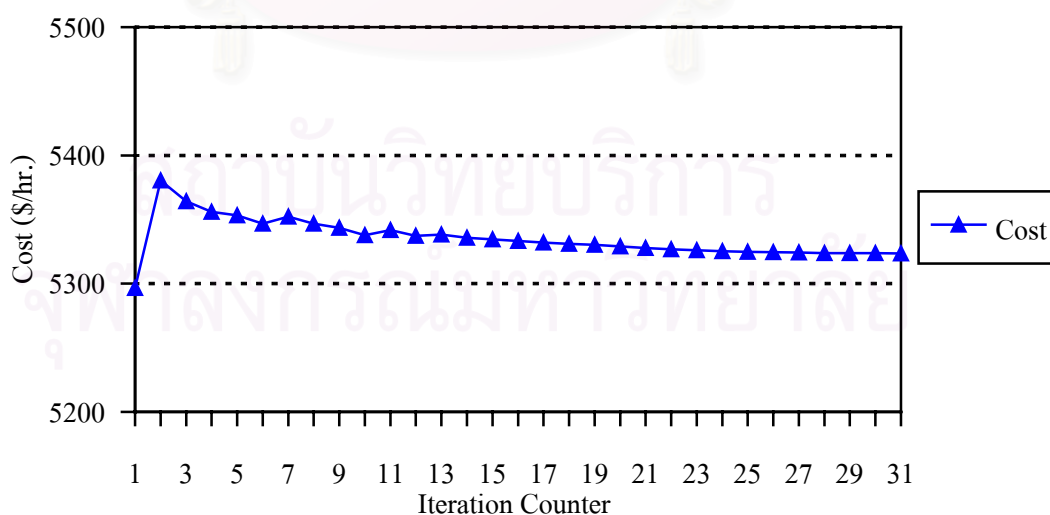
รูปที่ 5.4 แสดงผลตอบของระบบขนาด 9 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF

จากรูปที่ 5.4 สามารถสังเกตได้ว่าค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ OPF จะมีการแกว่งของมุมโรเตอร์ที่มากกว่าค่าขอบเขตของมุมที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ โดยในที่นี้เท่ากับ 100 องศาอยู่ 2 ช่วง คือในช่วง 0.5-0.8 วินาที และในช่วงตั้งแต่ 1.7 วินาทีเป็นต้นไป ผลที่ตามมาทำให้รีเลย์ที่ใช้ป้องกันการผัดจังหวะทำงาน โดยการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สูญเสียเสถียรภาพออกจากระบบ โดยในที่นี้จะถือว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเกิดขึ้น ส่วนค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ SCOPF นั้นจะมีค่าไม่เกิน 100 องศา ซึ่งเป็นผลมาจากการที่รวมข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพเข้าไปในการคำนวณ OPF ด้วย ทำให้ระบบสามารถทำงานอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพแม้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดในระบบเกิดขึ้น



รูปที่ 5.5 แสดงค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส

จากรูปที่ 5.5 สามารถสังเกตได้ว่าค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระหว่างการคำนวณ SCOPF นั้นจะถูกควบคุมให้มีค่ามุมโรเตอร์ไม่เกิน 100 องศา โดยมุมโรเตอร์ในรอบการคำนวณที่ 1 นั้นเป็นมุมโรเตอร์เริ่มต้นที่นำมาคำนวณใน SCOPF จากนั้นจะทำการคำนวณโดยวิธีวนซ้ำทำการปรับปรุงค่ามุมโรเตอร์ไปเรื่อย ๆ จนมีค่ามุมโรเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้ซึ่งมีค่าไม่เกิน 100 องศา



รูปที่ 5.6 แสดงค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 9 บัส

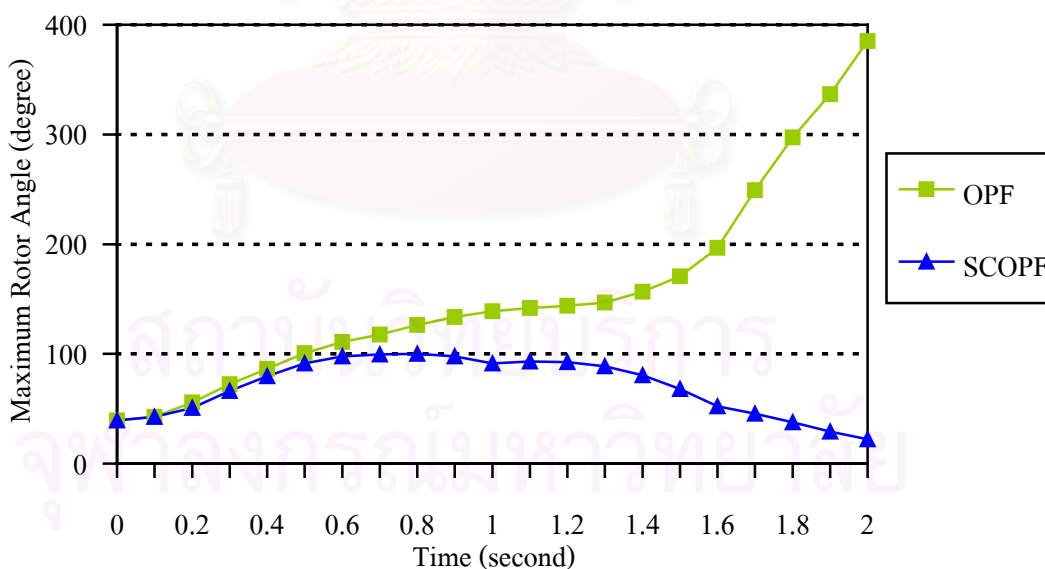
จากรูปที่ 5.6 สามารถสังเกตได้ว่าค่าต้นทุนในการผลิตที่ได้จากการคำนวณ SCOPF จะมีค่าสูงกว่าค่าต้นทุนในการผลิตจากการคำนวณ OPF เนื่องจากเหตุการณ์สมมติที่นำมาทดสอบผลการคำนวณ SCOPF นั้น จะทำให้มีเงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพมีผล (Active Constraint) กล่าวคือ ทำให้ระบบมีข้อจำกัดมากขึ้น จึงทำให้ต้นทุนการผลิตจึงมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย

5.2 ระบบขนาด 39 บัส

ระบบทดสอบที่ใช้นี้เป็นระบบ 39 บัส ซึ่งประกอบไปด้วยบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 บัส บัสที่มีโหลด 18 บัส และสายส่งจำนวน 46 เส้น ดังแสดงในภาคผนวก ก

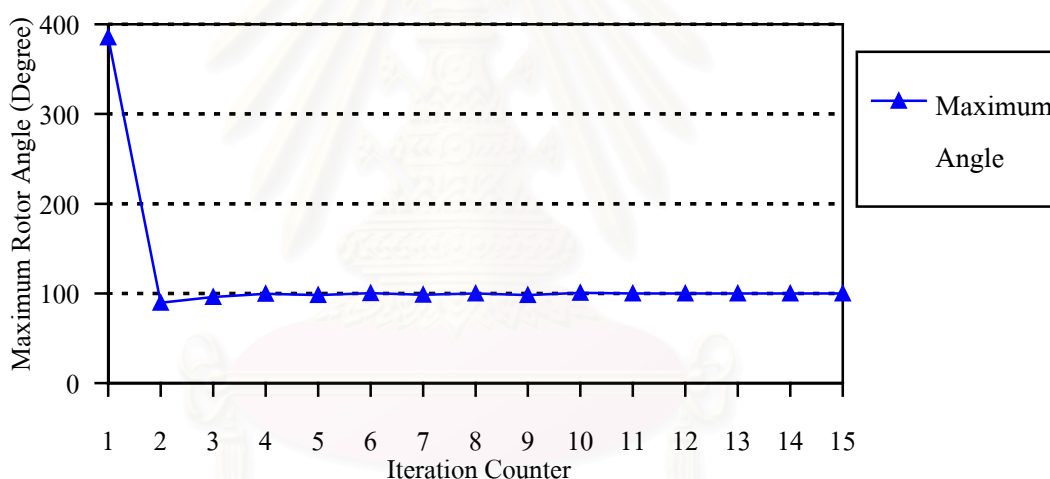
5.2.1 กรณีศึกษาที่ 1

ในระบบขนาด 39 บัสนี้ สมมติให้เกิดฟอลต์แบบสามเฟสลงดินที่บัสที่ 22 และใช้ระยะเวลาในการเคลียร์ฟอลต์ 0.1 วินาที พร้อมกับปลดสายส่ง 22-21 ออก จะได้



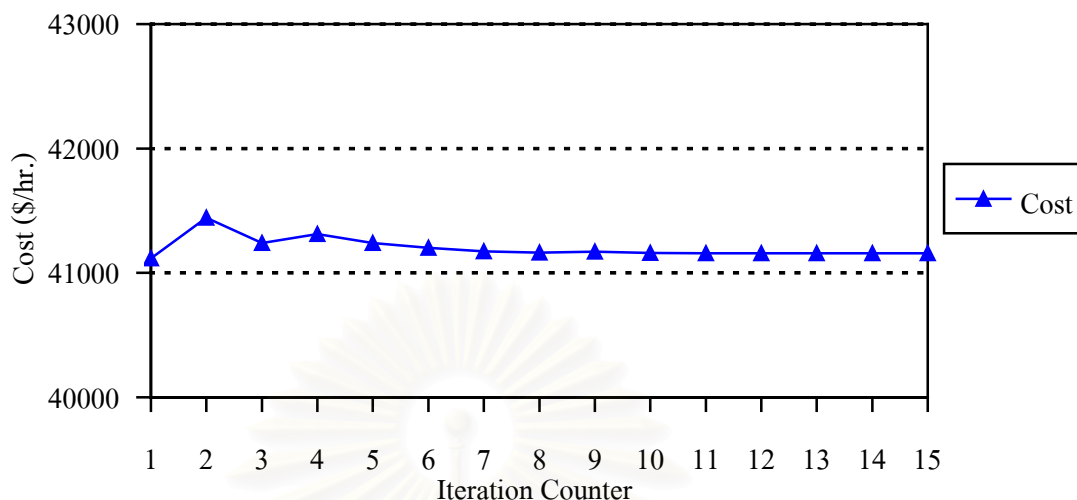
รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบของระบบขนาด 39 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF

จากรูปที่ 5.7 สามารถสังเกตได้ว่าค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ OPF จะมีการแกว่งของมุมโรเตอร์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา t ซึ่งมากกว่าค่าขอบเขตของมุมที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ โดยในที่นี้เท่ากับ 100 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 0.5 เป็นต้นไป ผลที่ตามมาทำให้รีเลย์ที่ใช้ป้องกันการผัดจังหวะทำงานโดยการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สูญเสียเสถียรภาพออกจากระบบ โดยในที่นี้จะถือว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเกิดขึ้น ส่วนค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ SCOPF นั้นจะมีค่าไม่เกิน 100 องศา ซึ่งเป็นผลมาจากการที่รวมข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพเข้าไปในการคำนวณ OPF ด้วย ทำให้ระบบสามารถทำงานอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพแม้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดในระบบเกิดขึ้น



รูปที่ 5.8 แสดงค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส

จากรูปที่ 5.8 สามารถสังเกตได้ว่าค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระหว่างการคำนวณ SCOPF นั้นจะถูกควบคุมให้มีค่ามุมโรเตอร์ไม่เกิน 100 องศา โดยมุมโรเตอร์ในรอบการคำนวณที่ 1 นั้นเป็นมุมโรเตอร์เริ่มต้นที่นำมาคำนวณใน SCOPF จากนั้นจะทำการคำนวณโดยวิธีวนซ้ำทำการปรับปรุงค่ามุมโรเตอร์ไปเรื่อย ๆ จนมีค่ามุมโรเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 100 องศา



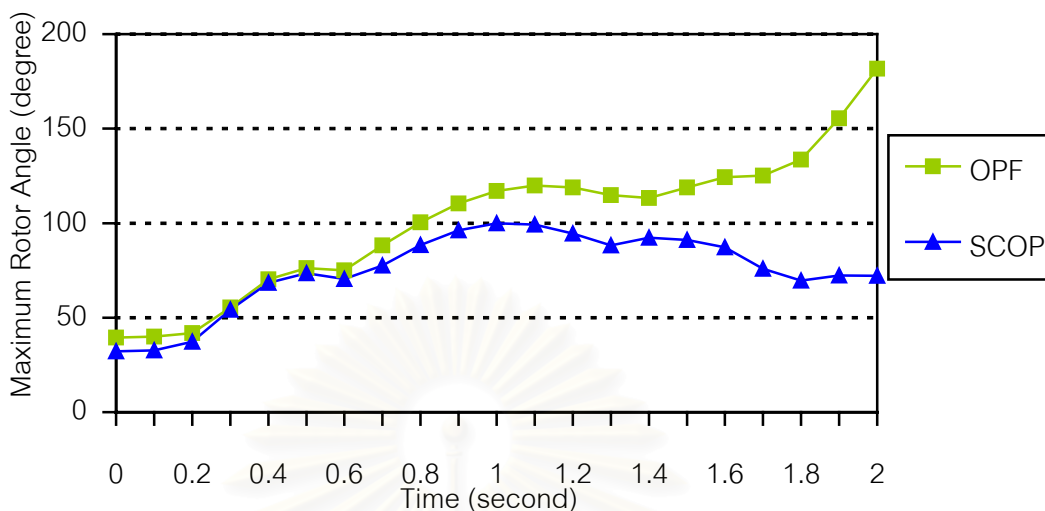
รูปที่ 5.9 แสดงค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส

จากรูปที่ 5.9 สามารถสังเกตได้ว่าค่าต้นทุนในการผลิตที่ได้จากการคำนวณ SCOPF จะมีค่าสูงกว่าค่าต้นทุนในการผลิตจากการคำนวณ OPF เนื่องจากเหตุการณ์สมมติที่นำมาทดสอบผลการคำนวณ SCOPF นั้น จะทำให้มีเงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพมีผล (Active Constraint) กล่าวคือ ทำให้ระบบมีข้อจำกัดมากขึ้น จึงทำให้ต้นทุนการผลิตจึงมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย

5.2.2 กรณีศึกษาที่ 2

ในระบบขนาด 39 บัสนี้ สมมติให้เกิดฟอลต์แบบสามเฟสลงดินที่บัสที่ 9 และใช้ระยะเวลาในการเคลียร์ฟอลต์ 0.3 วินาที พร้อมกับปลดสายส่ง 9-8 ออก จะได้

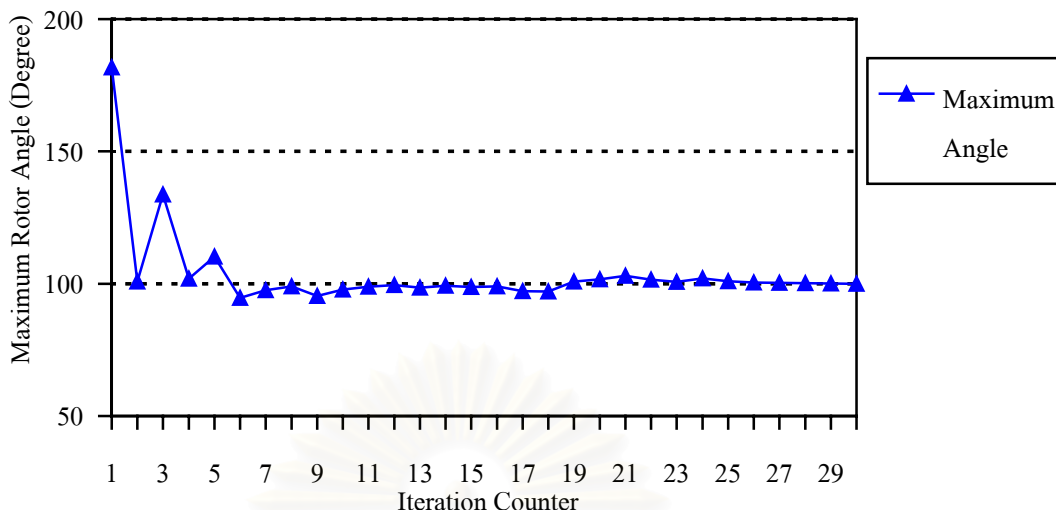
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบของระบบขนาด 39 บัส เมื่อใช้การคำนวณแบบ OPF และ SCOPF

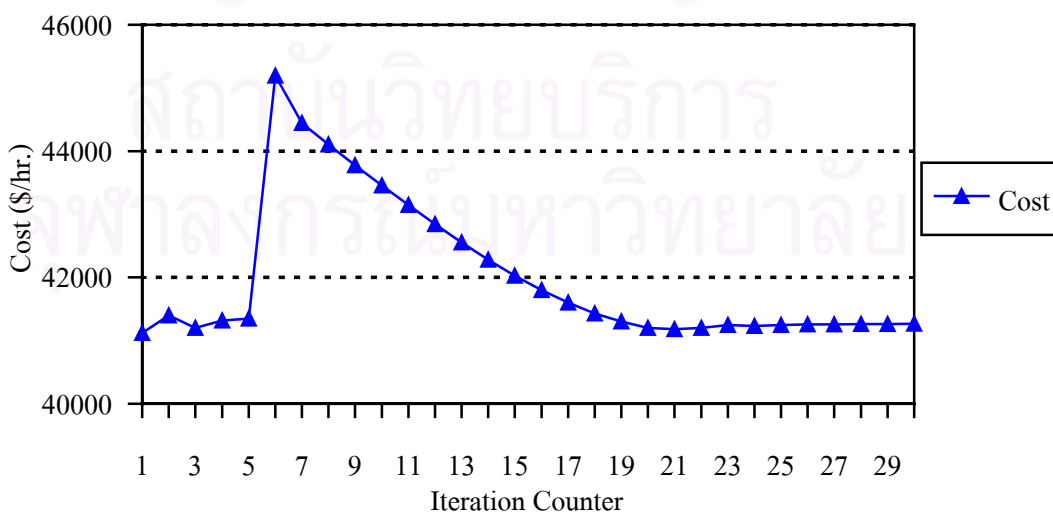
สามารถสังเกตได้ว่ารูปที่ 5.10 จะมีลักษณะแนวโน้มเดียวกันกับรูปที่ 5.7 กล่าวคือ ค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ OPF จะมีการแกว่งของมุมโรเตอร์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา t ซึ่งมากกว่าค่าขอบเขตของมุมที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ โดยในที่นี่เท่ากับ 100 องศา ตั้งแต่วันที่ 0.8 เป็นต้นไป ผลที่ตามมาทำให้รีเลย์ที่ใช้ป้องกันการผิดปกติทำงานโดยการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สูญเสียเสถียรภาพออกจากระบบ โดยในที่นี่จะถือว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเกิดขึ้น ส่วนค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ได้จากการคำนวณของ SCOPF นั้นจะมีค่าไม่เกิน 100 องศา ซึ่งเป็นผลมาจากการที่รวมข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพเข้าไปในการคำนวณ OPF ด้วย ทำให้ระบบสามารถทำงานอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพแม้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดในระบบเกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.11 แสดงค่าของมุมโรเตอร์ในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส

จากรูปที่ 5.11 สามารถสังเกตได้ว่าค่ามุมโรเตอร์ที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระหว่างการคำนวณ SCOPF นั้นจะถูกควบคุมให้มีค่ามุมโรเตอร์ไม่เกิน 100 องศา โดยมุมโรเตอร์ในรอบการคำนวณที่ 1 นั้นเป็นมุมโรเตอร์เริ่มต้นที่นำมาคำนวณใน SCOPF จากนั้นจะทำการคำนวณโดยวิธีวนซ้ำทำการปรับปรุุงค่ามุมโรเตอร์ไปเรื่อย ๆ จนมีค่ามุมโรเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 100 องศา



รูปที่ 5.12 แสดงค่าของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในระหว่างการคำนวณ SCOPF ของระบบขนาด 39 บัส

จากรูปที่ 5.12 สามารถสังเกตได้ว่าค่าต้นทุนในการผลิตที่ได้จากการคำนวณ SCOPF จะมีค่าสูงกว่าค่าต้นทุนในการผลิตจากการคำนวณ OPF เนื่องจากเหตุการณ์สมมติที่นำมาทดสอบผลการคำนวณ SCOPF นั้น จะทำให้มีเงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพมีผล (Active Constraint) กล่าวคือ ทำให้ระบบมีข้อจำกัดมากขึ้น จึงทำให้ต้นทุนการผลิตจึงมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยรวมข้อจำกัดทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยข้อจำกัดทางเสถียรภาพนี้พิจารณาจากการแกว่งของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เทียบกับมุมโรเตอร์เฉลี่ยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง ประกอบกับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยใช้วิธีการของรุงเง-คุตตาอันดับสี่ ร่วมกับวิธีการหาผลเฉลยโดยใช้ช่วงก้าวขนาดใหญ่ (Large Step-size Integration Method) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ทำให้สามารถคำนวณ SCOPF ได้อย่างรวดเร็ว

ระบบทดสอบแต่ละระบบจะทดสอบโดยใช้การคำนวณ SCOPF เปรียบเทียบผลกับการคำนวณ OPF แบบดั้งเดิม โดยเปรียบเทียบเสถียรภาพของระบบและต้นทุนการผลิตที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธี และวิเคราะห์ผล

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การคำนวณ SCOPF มีประโยชน์อย่างมากในการหาจุดทำงานของระบบที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด และระบบสามารถมีเสถียรภาพอยู่ได้แม้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในระบบ
- 2) สามารถใช้การคำนวณ SCOPF เป็นวิธีในการหาจุดทำงานใหม่ที่อยู่ภายในขอบเขตของเสถียรภาพที่เหมาะสม แทนการสุ่มทดลองหาจุดทำงาน (Trial-and-error Method) ซึ่งต้องใช้การตัดสินใจจากประสบการณ์ของวิศวกรควบคุม ทำให้การคำนวณแบบ SCOPF ใช้เวลาในการคำนวณเร็วกว่า
- 3) ค่าต้นทุนในการผลิตที่ได้จากการคำนวณ SCOPF จะมีค่ามากกว่าค่าต้นทุนในการผลิตที่ได้จากการคำนวณ OPF ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ที่ทำให้เงื่อนไขบังคับทางเสถียรภาพมีผล (Active Constraint) กล่าวคือ ทำให้ระบบมีข้อจำกัดมากขึ้น จึงทำให้ต้นทุนการผลิตจึงมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากวิธีการที่ได้นำเสนอและผลการทดสอบที่ได้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ ดังนี้

- 1) ควรมีการแก้ปัญหาในการลดจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมเชิงเส้นให้น้อยลง เพื่อลดภาระในการคำนวณ โปรแกรมเชิงเส้นซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของโปรแกรมโดยรวมมีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น เช่น ใช้วิธีการละเอียดหรือผ่อนปรนตัวแปรที่ไม่มีผลในการคำนวณ เป็นต้น
- 2) ควรมีการคำนวณเสถียรภาพแบบชั่วคราวให้ครอบคลุมมากขึ้น กล่าวคือ ควรจะเพิ่มกรณีในการศึกษาให้เป็นการคำนวณเสถียรภาพเมื่อมีอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งหลุด (N-1 Contingency) ไม่เพียงแต่ให้สายส่งหลุดเพียงอย่างเดียว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. IEEE Tutorial Course, Optimal Power Flow: Solution Techniques, Requirements and Challenges.
2. Carpentier, J., Contribution e l'etude do Dispatching Economique, Bulletin Society Francaise Electriciens, Vol.3 August 1962.
3. Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
4. O. Alsac, and J. Bright et al., Further Developments in LP-based Optimal Power Flow, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 697-711, 1990.
5. William D. Stevenson, Jr., Elements of Power System Analysis, 4th Edition, McGraw-Hill, 1982.
6. Glenn W. Stagg, and Ahmed H. El-Abiad, Computer Methods in Power System Analysis, McGraw-Hill, 1968.
7. P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1998.
8. M. A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 1989.
9. Peter W. Sauer and M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Upper Saddle River, New Jersey 07458, Prentice-Hall, 1994.
10. Dong, Y. and Pota, H. R., Fast Transient Stability Assessment using Large Step-size Numerical Integration, IEE Proc. C, July 1991, Vol. 138, No. 4, pp. 377-383.
11. Haque, M. H. and Rahim, A. H. M. A., Determination of First Swing Limit of Multimachine Power Systems Through Taylor Series Expansions, IEE Proc. C, Gen., Trans. And Distrib., Nov. 1989, Vol. 136, No. 6, pp. 373-379.
12. D. Gan, Robert J. Thomas and Ray D. Zimmerman, Stability-constrained Optimal Power Flow, IEEE Trans. Power Systems, May 2000, Vol. 15, No. 2, pp.535-540.
13. Stephen G. Nash and Ariela Sofer, Linear and Nonlinear Programming, McGraw-Hill International Editions, 1996.
14. B.Stott, J.L.Marinho and O.Alsac, Review of Linear Programming Applied to Power System Rescheduling, Power Industry Computer Applications Conference, 1979. PICA-79. IEEE Conference Proceedings, 1979, pp.142-154.

15. Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Ken-ichi Suzuki, Katsuhiko Suzuki, Practical Reactive Power Allocation/Operation Planning Using Successive Linear Programming, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.2, May 1988, pp.558-566.
16. Xihui Yan, Victor H. Quintana, Improving An Interior-Point-Based OPF by Dynamic Adjustments of Step Sizes and Tolerances, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No.2, May 1999, pp.709-717.
17. Luis S. Vargas, Victor H. Quintana and Anthony Vannelli, A Tutorial Description of An Interior Point Method and Its Application to Security-Constrained Economic Dispatch, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No.3, August 1993, pp.1315-1324.
18. Paul M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability, IEEE PRESS Power Systems Engineering Series, 1994.
19. K. R. Padiyar, Power System Dynamics Stability and Control, John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd., 1996.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

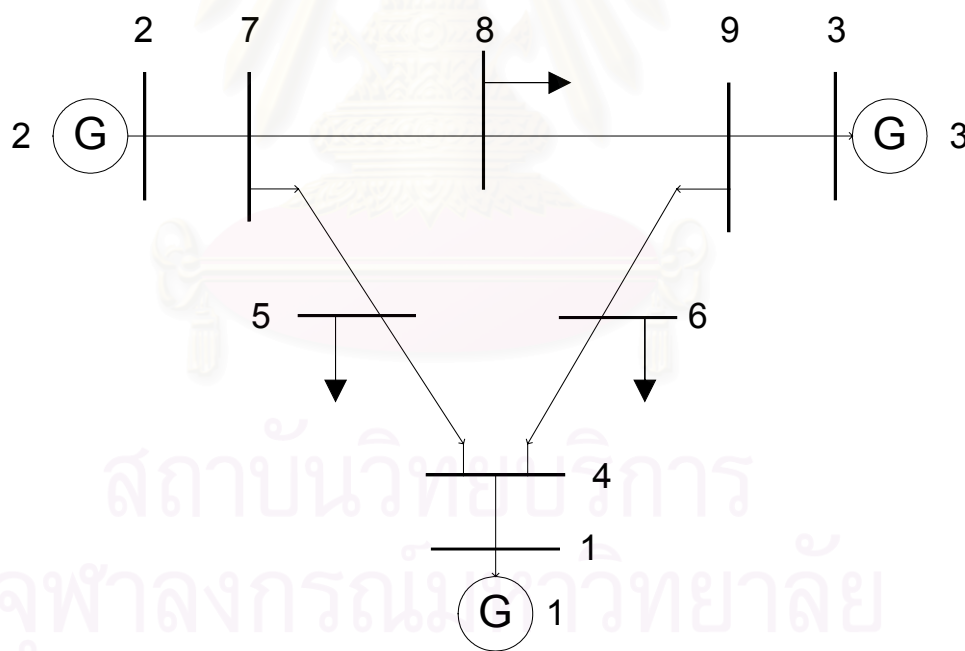
ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ภาคผนวก ก นี้แสดงข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 9 บัส และข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 39 บัส ตามลำดับ

ก.1 ระบบทดสอบขนาด 9 บัส

ข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 9 บัส ที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำมาจากหนังสือ Power System Control and Stability แต่งโดย P.M. Anderson และ A.A. Fouad [18] สามารถแสดงข้อมูลต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ ก.1 แสดงระบบทดสอบขนาด 9 บัส

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลบัสของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

Bus No	Bus Type	Pd (MW)	Qd (MVA)	Gs (MW)	Bs (MVA)	Vm (p.u.)	Va (deg)	Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Ref	0	0	0	0	1.040	0.00	1.1	0.9
2	PV	0	0	0	0	1.025	9.28	1.1	0.9
3	PV	0	0	0	0	1.025	4.67	1.1	0.9
4	PQ	0	0	0	0	1.026	-2.22	1.1	0.9
5	PQ	125	50	0	0	0.996	-3.99	1.1	0.9
6	PQ	90	30	0	0	1.013	-3.69	1.1	0.9
7	PQ	0	0	0	0	1.026	3.72	1.1	0.9
8	PQ	100	35	0	0	1.016	0.73	1.1	0.9
9	PQ	0	0	0	0	1.032	1.97	1.1	0.9

ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

Line No.	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (MVA)	TR Ratio	TR Angle (deg)
1	1	4	0.0000	0.0576	0.0000	250	1	0
2	4	6	0.0170	0.0920	0.1580	250	0	0
3	6	9	0.0390	0.1700	0.3580	150	0	0
4	3	9	0.0000	0.0586	0.0000	300	1	0
5	8	9	0.0119	0.1008	0.2090	150	0	0
6	7	8	0.0085	0.0720	0.1490	250	0	0
7	7	2	0.0000	0.0625	0.0000	250	1	0
8	5	7	0.0320	0.1610	0.3060	250	0	0
9	5	4	0.0100	0.0850	0.1760	250	0	0

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

Gen No	Pg (MW)	Qg (MVA)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVA)	Qmin (MVA)	X'd (p.u.)	H (p.u.)
1	0	0	250	10	300	-300	0.0608	23.64
2	163	0	300	10	300	-300	0.1198	6.4
3	85	0	270	10	300	-300	0.1813	3.01

เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การหาค่าต่ำสุดของต้นทุนในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง ซึ่งกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามกำลังสอง (Polynomial) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$f_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2$$

โดยที่ a_i, b_i, c_i คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

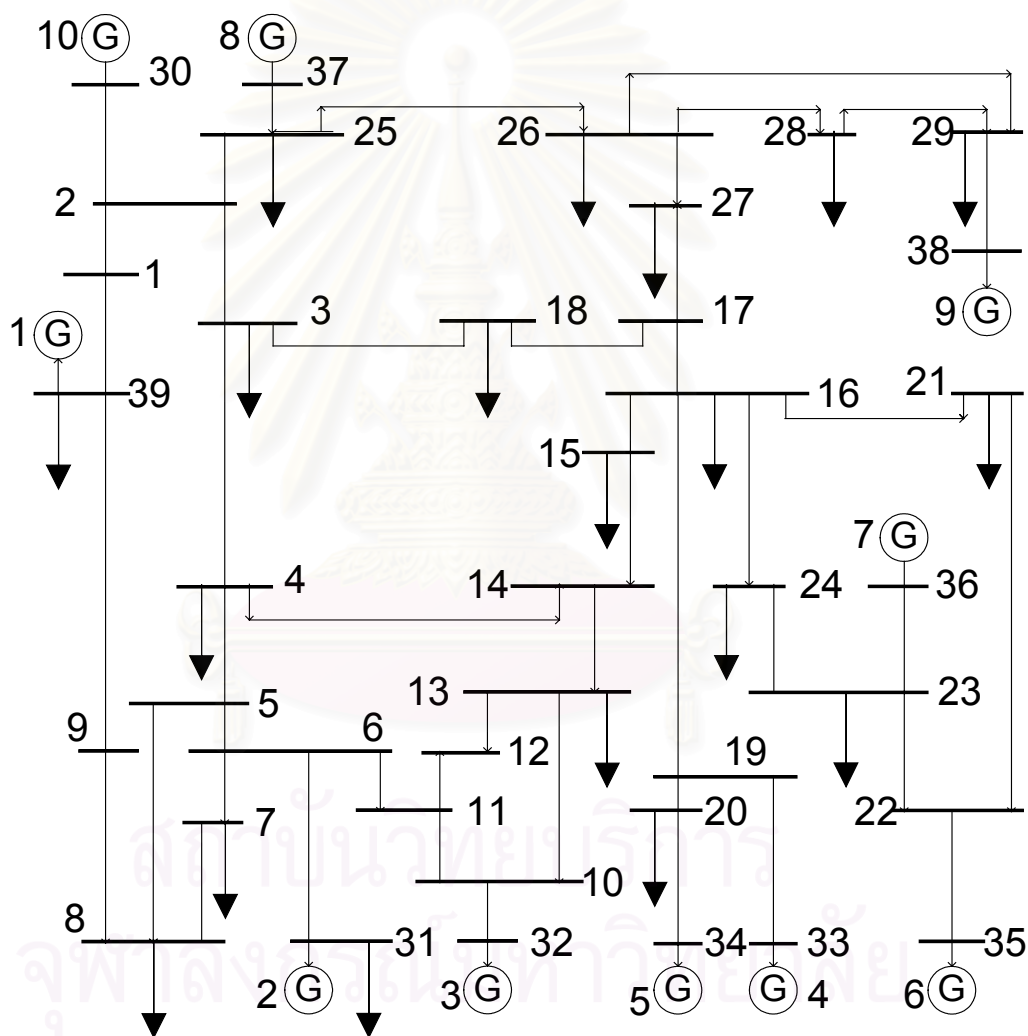
ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องของระบบทดสอบขนาด 9 บัส มีสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 แสดงสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่ใช้ในการหาต้นทุนในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

Gen No.	a	b	c
1	150	5.00	0.1100
2	600	1.20	0.0850
3	335	1.00	0.1225

ก.2 ระบบทดสอบขนาด 39 บัส

ข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 39 บัส ที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำมาจากหนังสือ Energy Function Analysis for Power System Stability แต่งโดย M.A. Pai [8] สามารถแสดงข้อมูลต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ ก.2 แสดงระบบทดสอบขนาด 39 บัส

ตารางที่ ก.5 แสดงข้อมูลบัสของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Bus No	Bus Type	Pd (MW)	Qd (MVA)	Gs (MW)	Bs (MVA)	Vm (p.u.)	Va (deg)	Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0000	0.00	1.06	0.94
2	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0000	0.00	1.06	0.94
3	PQ	3220	2.4	0	0	1.0341	-9.73	1.06	0.94
4	PQ	5000	1840	0	0	1.0116	-10.53	1.06	0.94
5	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0165	-9.38	1.06	0.94
6	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0172	-8.68	1.06	0.94
7	PQ	2338	840	0	0	1.0067	-10.84	1.06	0.94
8	PQ	5220	1766	0	0	1.0057	-11.34	1.06	0.94
9	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0322	-11.15	1.06	0.94
10	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0235	-6.31	1.06	0.94
11	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0201	-7.12	1.06	0.94
12	PQ	8.5	880	0	0	1.0072	-7.14	1.06	0.94
13	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0207	-7.02	1.06	0.94
14	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0181	-8.66	1.06	0.94
15	PQ	3200	1530	0	0	1.0194	-9.06	1.06	0.94
16	PQ	3294	323	0	0	1.0346	-7.66	1.06	0.94
17	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0365	-8.65	1.06	0.94
18	PQ	1580	300	0	0	1.0343	-9.49	1.06	0.94
19	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0509	-3.04	1.06	0.94
20	PQ	6800	1030	0	0	0.9914	-4.45	1.06	0.94
21	PQ	2740	1150	0	0	1.0337	-5.26	1.06	0.94
22	PQ	0.0	0.0	0	0	1.0509	-0.82	1.06	0.94
23	PQ	247.5	84.6	0	0	1.0459	-1.02	1.06	0.94
24	PQ	3086	-92.2	0	0	1.0399	-7.54	1.06	0.94

ตารางที่ ก.5 แสดงข้อมูลบัสของระบบทดสอบขนาด 39 บัส (ต่อ)

Bus No	Bus Type	Pd (MW)	Qd (MVA)	Gs (MW)	Bs (MVA)	Vm (p.u.)	Va (deg)	Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
25	PQ	2240	47.2	0	0	1.0587	-5.51	1.06	0.94
26	PQ	1390	17.0	0	0	1.0536	-6.77	1.06	0.94
27	PQ	2810	75.5	0	0	1.0399	-8.78	1.06	0.94
28	PQ	2060	27.6	0	0	1.0509	-3.27	1.06	0.94
29	PQ	2835	26.9	0	0	1.0505	-0.51	1.06	0.94
30	PV	0.0	0.0	0	0	1.0475	0.00	1.06	0.94
31	Ref	9.2	4.6	0	0	0.9820	0.00	1.06	0.94
32	PV	0.0	0.0	0	0	0.9831	1.63	1.06	0.94
33	PV	0.0	0.0	0	0	0.9972	2.18	1.06	0.94
34	PV	0.0	0.0	0	0	1.0123	0.74	1.06	0.94
35	PV	0.0	0.0	0	0	1.0493	4.14	1.06	0.94
36	PV	0.0	0.0	0	0	1.0635	6.83	1.06	0.94
37	PV	0.0	0.0	0	0	1.0278	1.27	1.06	0.94
38	PV	0.0	0.0	0	0	1.0265	6.55	1.06	0.94
39	PV	11040	2500	0	0	1.0300	-10.96	1.06	0.94

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Line No.	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (MVA)	TR. Ratio	TR.Angle (deg.)
1	1	2	0.0035	0.0411	0.6987	9900	0.0000	0
2	1	39	0.0010	0.0250	0.7500	9900	0.0000	0
3	2	3	0.0013	0.0151	0.2572	9900	0.0000	0
4	2	25	0.0070	0.0086	0.1460	9900	0.0000	0
5	3	4	0.0013	0.0213	0.2214	9900	0.0000	0
6	3	18	0.0011	0.0133	0.2138	9900	0.0000	0
7	4	5	0.0008	0.0128	0.1342	9900	0.0000	0

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบขนาด 39 บัส (ต่อ)

Line No.	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (MVA)	TR. Ratio	TR.Angle (deg.)
8	4	14	0.0008	0.0129	0.1382	9900	0.0000	0
9	5	6	0.0002	0.0026	0.0434	9900	0.0000	0
10	5	8	0.0008	0.0112	0.1476	9900	0.0000	0
11	6	7	0.0006	0.0092	0.1130	9900	0.0000	0
12	6	11	0.0007	0.0082	0.1389	9900	0.0000	0
13	7	8	0.0004	0.0046	0.0780	9900	0.0000	0
14	8	9	0.0023	0.0363	0.3804	9900	0.0000	0
15	9	39	0.0010	0.0250	1.2000	9900	0.0000	0
16	10	11	0.0004	0.0043	0.0729	9900	0.0000	0
17	10	13	0.0004	0.0043	0.0729	9900	0.0000	0
18	13	14	0.0009	0.0101	0.1723	9900	0.0000	0
19	14	15	0.0018	0.0217	0.3660	9900	0.0000	0
20	15	16	0.0009	0.0094	0.1710	9900	0.0000	0
21	16	17	0.0007	0.0089	0.1342	9900	0.0000	0
22	16	19	0.0016	0.0195	0.3040	9900	0.0000	0
23	16	21	0.0008	0.0135	0.2548	9900	0.0000	0
24	16	24	0.0003	0.0059	0.0680	9900	0.0000	0
25	17	18	0.0007	0.0082	0.1319	9900	0.0000	0
26	17	27	0.0013	0.0173	0.3216	9900	0.0000	0
27	21	22	0.0008	0.0140	0.2565	9900	0.0000	0
28	22	23	0.0006	0.0096	0.1846	9900	0.0000	0
29	23	24	0.0022	0.0350	0.3610	9900	0.0000	0
30	25	26	0.0032	0.0323	0.5130	9900	0.0000	0

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบขนาด 39 บัส (ต่อ)

Line No.	From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (MVA)	TR. Ratio	TR.Angle (deg.)
31	26	27	0.0014	0.0147	0.2396	9900	0.0000	0
32	26	28	0.0043	0.0474	0.7802	9900	0.0000	0
33	26	29	0.0057	0.0625	1.0290	9900	0.0000	0
34	28	29	0.0014	0.0151	0.2490	9900	0.0000	0
35	12	11	0.0016	0.0435	0.0000	9900	1.0060	0
36	12	13	0.0016	0.0435	0.0000	9900	1.0060	0
37	6	31	0.0000	0.0250	0.0000	9900	1.0700	0
38	10	32	0.0000	0.0200	0.0000	9900	1.0700	0
39	19	33	0.0007	0.0142	0.0000	9900	1.0700	0
40	20	34	0.0009	0.0180	0.0000	9900	1.0090	0
41	22	35	0.0000	0.0143	0.0000	9900	1.0250	0
42	23	36	0.0005	0.0272	0.0000	9900	1.0000	0
43	25	37	0.0006	0.0232	0.0000	9900	1.0250	0
44	2	30	0.0000	0.0181	0.0000	9900	1.0250	0
45	29	38	0.0008	0.0156	0.0000	9900	1.0250	0
46	19	20	0.0007	0.0138	0.0000	9900	1.0600	0

ตารางที่ ก.7 แสดงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Gen No.	Pg (MW)	Qg (MVA)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVA)	Qmin (MVA)	X'd (p.u.)	H (p.u.)
30	250	103.3	350	0	9999	-9999	0.0310	42.0
31	5729	170.3	1145.55	0	9999	-9999	0.0697	30.3
32	650	175.9	750	0	9999	-9999	0.0531	35.8
33	632	103.3	732	0	9999	-9999	0.0436	28.6
34	508	164.4	608	0	9999	-9999	0.1320	26.0
35	650	204.8	750	0	9999	-9999	0.0500	34.8
36	560	96.9	660	0	9999	-9999	0.0490	26.4
37	540	-4.4	640	0	9999	-9999	0.0570	24.3
38	830	19.4	930	0	9999	-9999	0.0570	34.5
39	1000	68.5	1100	0	9999	-9999	0.0060	50.0

เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในวิธานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การหาค่าต่ำสุดของต้นทุนในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง ซึ่งกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามกำลังสอง (Polynomial) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$f_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2$$

โดยที่ a_i, b_i, c_i คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

ดังนั้นในวิธานิพนธ์ฉบับนี้จะสมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องของระบบทดสอบขนาด 39 บัส มีสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ ก.8

ตารางที่ ก.8 แสดงฟังก์ชันค่าเฉลี่ยเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Gen No.	a	b	c
1	0.2	0.3	0.01
2	0.2	0.3	0.01
3	0.2	0.3	0.01
4	0.2	0.3	0.01
5	0.2	0.3	0.01
6	0.2	0.3	0.01
7	0.2	0.3	0.01
8	0.2	0.3	0.01
9	0.2	0.3	0.01
10	0.2	0.3	0.01



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ OPF และ SCOPF

ภาคผนวก ข นี้แสดงข้อมูลจุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ OPF และ SCOPF ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส และระบบทดสอบขนาด 39 บัส ตามลำดับ

ข.1 จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

ข้อมูลจุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส สามารถแสดงข้อมูลรายละเอียดได้ดังนี้

ผลจากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส จะได้ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีค่าเท่ากับ 5296.69 \$/hr.

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	1.100	0.000	89.80	12.97	-	-
2	1.097	4.894	134.32	0.03	-	-
3	1.087	3.250	94.19	-22.63	-	-
4	1.094	-2.463	-	-	-	-
5	1.072	-4.615	-	-	125	50
6	1.084	-3.982	-	-	90	30
7	1.100	0.906	-	-	-	-
8	1.089	-1.196	-	-	100	35
9	1.100	0.603	-	-	-	-
Total:			318.31	-9.64	315	115

ตารางที่ ข.2 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบ
ขนาด 9 บัส

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	4	89.80	12.97	-89.80	-9.05	0.000	3.920
2	4	6	35.22	-3.89	-35.04	-13.88	0.181	0.980
3	6	9	-54.96	-16.12	55.97	-22.19	1.010	4.400
4	3	9	94.19	-22.63	-94.19	27.29	0.000	4.660
5	8	9	-38.07	-18.68	38.22	-5.10	0.149	1.260
6	7	8	62.21	0.82	-61.93	-16.32	0.279	2.360
7	7	2	-134.32	9.33	134.32	0.03	0.000	9.360
8	5	7	-70.72	-18.92	72.11	-10.15	1.394	7.010
9	5	4	-54.28	-31.08	54.58	12.94	0.295	2.510
Total:							3.307	36.460

ข.2 จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

ข้อมูลจุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส
สามารถแสดงข้อมูลรายละเอียดได้ดังนี้

ผลจากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส จะได้ค่าต้นทุน
การผลิตไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีค่าเท่ากับ 5322.58 \$/hr.

ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลบัลต์ที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบ
ขนาด 9 บัลต์

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVAr)	Pd (MW)	Qd (MVAr)
1	1.017	0.000	91.07	14.41	-	-
2	1.008	6.057	140.69	-5.07	-	-
3	1.046	2.686	87.20	10.32	-	-
4	1.010	-2.927	-	-	-	-
5	0.982	-5.434	-	-	125	50
6	1.006	-4.848	-	-	90	30
7	1.015	1.124	-	-	-	-
8	1.013	-1.624	-	-	100	35
9	1.041	-0.004	-	-	-	-
Total:			318.96	19.66	315	115

ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1
ของระบบทดสอบขนาด 9 บัลต์

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	4	91.07	14.41	-91.07	-9.68	0.000	4.740
2	4	6	36.74	-9.43	-36.51	-5.40	0.225	1.220
3	6	9	-53.49	-24.60	54.61	-8.03	1.119	4.880
4	3	9	87.20	10.32	-87.20	-6.18	0.000	4.130
5	8	9	-32.40	-34.67	32.59	14.21	0.188	1.590
6	7	8	67.98	-11.74	-67.59	-0.33	0.383	3.240
7	7	2	-140.69	17.27	140.69	-5.07	0.000	12.200
8	5	7	-71.04	-16.55	72.71	-5.53	1.676	8.430
9	5	4	-53.96	-33.45	54.33	19.10	0.367	3.120
Total:							3.958	43.550

ข.3 จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

ข้อมูลจุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส สามารถแสดงข้อมูลรายละเอียดได้ดังนี้

ผลจากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส จะได้ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีค่าเท่ากับ 5317.60 \$/hr.

ตารางที่ ข.5 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	0.989	0.000	92.04	-17.68	-	-
2	1.100	3.797	133.32	53.27	-	-
3	1.030	2.671	93.72	-20.08	-	-
4	1.001	-3.071	-	-	-	-
5	0.997	-5.783	-	-	125	50
6	1.000	-5.051	-	-	90	30
7	1.072	-0.254	-	-	-	-
8	1.048	-2.385	-	-	100	35
9	1.042	-0.262	-	-	-	-
Total:			319.08	15.51	315	115

ตารางที่ ข.6 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 9 บัส

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	1	4	92.04	-17.68	-92.04	22.86	0.000	5.170
2	4	6	36.63	-13.03	-36.40	-1.52	0.232	1.260
3	6	9	-53.60	-28.48	54.77	-3.78	1.165	5.080
4	3	9	93.72	-20.08	-93.72	25.15	0.000	5.080
5	8	9	-38.78	0.04	38.95	-21.38	0.177	1.500
6	7	8	61.57	21.22	-61.22	-35.04	0.346	2.930
7	7	2	-133.32	-42.62	133.32	53.27	0.000	10.650
8	5	7	-69.89	-44.87	71.75	21.40	1.855	9.340
9	5	4	-55.11	-5.13	55.42	-9.83	0.307	2.610
Total:							4.082	43.610

ข.4 จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

ข้อมูลจุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส สามารถแสดงข้อมูลรายละเอียดได้ดังนี้

ผลจากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส จะได้ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีค่าเท่ากับ 41117.8 \$/hr.

ตารางที่ ข.7 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVAr)	Pd (MW)	Qd (MVAr)
1	1.052	-13.268	-	-	-	-
2	1.044	-7.228	-	-	-	-
3	1.041	-9.867	-	-	322.00	2.40
4	1.035	-10.691	-	-	500.00	184.00
5	1.047	-9.822	-	-	-	-
6	1.052	-9.115	-	-	-	-
7	1.039	-11.506	-	-	233.80	84.00
8	1.036	-12.157	-	-	522.00	176.60
9	1.053	-14.989	-	-	-	-
10	1.060	-6.701	-	-	-	-
11	1.056	-7.521	-	-	-	-
12	1.043	-7.473	-	-	8.50	88.00
13	1.054	-7.305	-	-	-	-
14	1.044	-8.714	-	-	-	-
15	1.034	-8.456	-	-	320.00	153.00
16	1.044	-6.804	-	-	329.40	32.30
17	1.045	-8.444	-	-	-	-
18	1.042	-9.405	-	-	158.00	30.00
19	1.060	-1.148	-	-	-	-
20	0.999	-1.744	-	-	680.00	103.00

ตารางที่ ข.7 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส (ต่อ)

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
21	1.042	-4.119	-	-	274.00	115.00
22	1.058	0.589	-	-	-	-
23	1.050	0.627	-	-	247.50	84.60
24	1.048	-6.561	-	-	308.60	-92.20
25	1.060	-5.971	-	-	224.00	47.20
26	1.060	-8.436	-	-	139.00	17.00
27	1.048	-9.580	-	-	281.00	75.50
28	1.057	-7.204	-	-	206.00	27.60
29	1.055	-5.189	-	-	283.50	26.90
30	1.010	-3.699	350.00	-38.03	-	-
31	1.060	0.000	669.42	384.07	9.20	4.60
32	1.035	0.741	663.79	270.85	-	-
33	1.007	4.058	643.34	115.55	-	-
34	1.019	4.396	608.00	167.95	-	-
35	1.060	5.465	650.31	233.69	-	-
36	1.060	9.685	645.75	77.25	-	-
37	1.043	1.921	639.91	65.99	-	-
38	1.025	0.281	643.33	-29.24	-	-
39	1.047	-16.855	683.83	118.59	1104.00	250.00
Total:			6197.67	1366.67	6150.50	1409.50

ตารางที่ ข.8 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบ
ขนาด 39 บัส

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	-276.44	19.89	278.97	-67.05	2.52	29.64
2	1	39	276.44	-19.89	-275.75	-45.36	0.69	17.36
3	2	3	331.77	-11.42	-330.46	-1.31	1.31	15.24
4	2	25	-260.73	18.46	265.14	-29.21	4.41	5.41
5	3	4	74.24	12.13	-74.17	-34.80	0.07	1.20
6	3	18	-65.78	-13.22	65.83	-9.44	0.04	0.53
7	4	5	-133.63	-91.99	133.82	80.44	0.19	2.99
8	4	14	-292.20	-57.21	292.85	52.84	0.66	10.57
9	5	6	-534.05	-151.18	534.61	153.69	0.56	7.29
10	5	8	400.23	70.74	-399.01	-69.75	1.22	17.00
11	6	7	503.65	120.86	-502.19	-110.76	1.46	22.44
12	6	11	-378.05	-24.11	378.95	19.30	0.91	10.62
13	7	8	268.39	26.76	-268.12	-32.05	0.27	3.11
14	8	9	145.13	-74.81	-144.62	41.39	0.51	8.12
15	9	39	144.62	-41.39	-144.42	-86.06	0.19	4.85
16	10	11	379.09	63.77	-378.56	-66.25	0.53	5.68
17	10	13	284.70	111.06	-284.36	-115.60	0.34	3.61
18	13	14	275.41	72.95	-274.74	-84.42	0.67	7.51
19	14	15	-18.11	31.58	18.16	-70.51	0.05	0.59
20	15	16	-338.16	-82.49	339.17	74.56	1.01	10.53
21	16	17	348.45	-37.37	-347.67	32.72	0.79	9.99
22	16	19	-560.29	-28.46	564.90	51.00	4.61	56.19
23	16	21	-374.49	34.22	375.53	-44.28	1.05	17.66

ตารางที่ ข.8 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ OPF ของระบบทดสอบ
ขนาด 39 บัส (ต่อ)

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
24	16	24	-82.24	-75.25	82.28	68.46	0.03	0.64
25	17	18	224.15	10.00	-223.83	-20.56	0.32	3.80
26	17	27	123.52	-42.72	-123.33	10.04	0.19	2.52
27	21	22	-649.53	-70.72	652.67	97.28	3.13	54.83
28	22	23	-2.36	75.64	2.40	-95.51	0.04	0.63
29	23	24	393.97	-14.23	-390.88	23.74	3.10	49.26
30	25	26	148.48	-40.31	-147.85	-10.95	0.63	6.38
31	26	27	158.06	62.97	-157.67	-85.54	0.38	4.03
32	26	28	-49.72	-31.64	49.82	-54.66	0.10	1.11
33	26	29	-99.49	-37.38	100.01	-71.96	0.52	5.74
34	28	29	-255.82	27.06	256.66	-45.74	0.84	9.07
35	12	11	0.42	-46.10	-0.39	46.96	0.03	0.86
36	12	13	-8.92	-41.90	8.95	42.65	0.03	0.74
37	6	31	-660.22	-250.44	660.22	379.47	0.00	129.02
38	10	32	-663.79	-174.83	663.79	270.85	0.00	96.02
39	19	33	-640.39	-55.76	643.34	115.55	2.95	59.79
40	20	34	-604.55	-99.03	608.00	167.95	3.45	68.93
41	22	35	-650.31	-172.91	650.31	233.69	0.00	60.77
42	23	36	-643.87	25.14	645.75	77.25	1.88	102.39
43	25	37	-637.62	22.32	639.91	65.99	2.28	88.30
44	2	30	-350.00	60.01	350.00	-38.03	0.00	21.98
45	29	38	-640.17	90.80	643.33	-29.24	3.16	61.56
46	19	20	75.49	4.76	-75.45	-3.97	0.04	0.79
Total:							47.17	1097.31

ข.5 จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

ข้อมูลจุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส สามารถแสดงข้อมูลรายละเอียดได้ดังนี้

ผลจากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส จะได้ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีค่าเท่ากับ 41156.52 \$/hr.

ตารางที่ ข.9 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	1.049	-13.430	-	-	-	-
2	1.044	-7.577	-	-	-	-
3	1.040	-10.292	-	-	322.00	2.40
4	1.034	-11.022	-	-	500.00	184.00
5	1.045	-10.049	-	-	-	-
6	1.049	-9.325	-	-	-	-
7	1.036	-11.720	-	-	233.80	84.00
8	1.034	-12.370	-	-	522.00	176.60
9	1.049	-15.113	-	-	-	-
10	1.057	-6.922	-	-	-	-
11	1.053	-7.740	-	-	-	-
12	1.040	-7.715	-	-	8.50	88.00
13	1.052	-7.569	-	-	-	-
14	1.043	-9.083	-	-	-	-
15	1.034	-9.118	-	-	320.00	153.00
16	1.044	-7.593	-	-	329.40	32.30
17	1.045	-9.072	-	-	-	-
18	1.042	-9.956	-	-	158.00	30.00
19	1.060	-1.832	-	-	-	-
20	0.998	-2.424	-	-	680.00	103.00

ตารางที่ ข.9 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบ
ขนาด 39 บัส (ต่อ)

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVAr)	Pd (MW)	Qd (MVAr)
21	1.043	-5.198	-	-	274.00	115.00
22	1.059	-0.790	-	-	-	-
23	1.051	-0.812	-	-	247.50	84.60
24	1.049	-7.442	-	-	308.60	-92.20
25	1.060	-6.331	-	-	224.00	47.20
26	1.060	-8.791	-	-	139.00	17.00
27	1.048	-10.060	-	-	281.00	75.50
28	1.057	-7.356	-	-	206.00	27.60
29	1.055	-5.276	-	-	283.50	26.90
30	1.011	-4.051	350.00	-31.97	-	-
31	1.060	0.000	683.03	395.26	9.20	4.60
32	1.030	0.733	677.65	260.52	-	-
33	1.009	3.450	653.89	125.24	-	-
34	1.016	3.747	608.00	158.40	-	-
35	1.060	3.869	622.03	224.32	-	-
36	1.060	7.645	603.81	66.91	-	-
37	1.043	1.556	640.00	69.22	-	-
38	1.026	0.332	660.26	-25.75	-	-
39	1.041	-16.926	697.88	103.93	1104.00	250.00
Total:			6196.54	1346.08	6150.50	1409.50

ตารางที่ ข.10 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1
ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	1	2	-267.57	10.30	269.92	-59.19	2.35	27.63
2	1	39	267.57	-10.30	-266.91	-55.10	0.66	16.49
3	2	3	341.19	-9.90	-339.80	-1.92	1.39	16.12
4	2	25	-261.10	15.24	265.52	-25.99	4.41	5.42
5	3	4	66.16	17.97	-66.09	-40.74	0.06	1.04
6	3	18	-48.36	-18.45	48.38	-4.43	0.02	0.29
7	4	5	-148.19	-86.30	148.40	75.19	0.21	3.38
8	4	14	-285.71	-56.96	286.34	52.22	0.63	10.15
9	5	6	-544.65	-149.12	545.23	151.95	0.58	7.58
10	5	8	396.24	73.94	-395.04	-73.08	1.20	16.80
11	6	7	502.37	123.24	-500.90	-113.05	1.47	22.48
12	6	11	-373.77	-19.50	374.66	14.56	0.89	10.41
13	7	8	267.10	29.05	-266.83	-34.30	0.27	3.10
14	8	9	139.87	-69.23	-139.40	35.43	0.47	7.46
15	9	39	139.40	-35.43	-139.22	-90.97	0.19	4.63
16	10	11	375.79	58.84	-375.27	-61.37	0.52	5.59
17	10	13	301.86	102.28	-301.49	-106.44	0.37	3.94
18	13	14	293.54	63.65	-292.80	-74.19	0.75	8.36
19	14	15	6.46	21.97	-6.43	-61.06	0.03	0.36
20	15	16	-313.57	-91.94	314.46	82.72	0.89	9.25
21	16	17	314.52	-33.18	-313.88	26.66	0.64	8.13
22	16	19	-570.58	-24.61	575.36	49.17	4.78	58.21
23	16	21	-334.88	25.20	335.71	-38.89	0.83	14.07

ตารางที่ ข.10 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 1
ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส (ต่อ)

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
24	16	24	-52.92	-82.44	52.94	75.47	0.03	0.49
25	17	18	206.66	14.45	-206.38	-25.57	0.28	3.24
26	17	27	107.23	-41.11	-107.08	7.82	0.14	1.91
27	21	22	-609.71	-76.11	612.48	96.14	2.76	48.36
28	22	23	9.56	72.53	-9.52	-92.49	0.04	0.60
29	23	24	364.18	-14.54	-361.54	16.73	2.64	42.00
30	25	26	148.20	-40.30	-147.57	-10.99	0.63	6.35
31	26	27	174.37	61.42	-173.92	-83.32	0.45	4.71
32	26	28	-58.03	-30.93	58.16	-54.98	0.14	1.49
33	26	29	-107.77	-36.50	108.38	-71.89	0.61	6.71
34	28	29	-264.16	27.38	265.06	-45.49	0.90	9.66
35	12	11	-0.58	-45.95	0.61	46.81	0.03	0.86
36	12	13	-7.92	-42.05	7.95	42.79	0.03	0.74
37	6	31	-673.83	-255.68	673.83	390.66	0.00	134.98
38	10	32	-677.65	-161.12	677.65	260.52	0.00	99.40
39	19	33	-650.84	-63.37	653.89	125.24	3.05	61.87
40	20	34	-604.56	-89.62	608.00	158.40	3.44	68.78
41	22	35	-622.03	-168.67	622.03	224.32	0.00	55.65
42	23	36	-602.16	22.43	603.81	66.91	1.64	89.34
43	25	37	-637.72	19.08	640.00	69.22	2.28	88.30
44	2	30	-350.00	53.84	350.00	-31.97	0.00	21.87
45	29	38	-656.94	90.48	660.26	-25.75	3.32	64.73
46	19	20	75.48	14.20	-75.44	-13.38	0.04	0.81
Total:							46.04	1073.77

ข.6 จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

ข้อมูลจุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส สามารถแสดงข้อมูลรายละเอียดได้ดังนี้

ผลจากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส จะได้ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีค่าเท่ากับ 41265.77 \$/hr.

ตารางที่ ข.11 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	1.004	-13.059	-	-	-	-
2	1.018	-7.401	-	-	-	-
3	1.020	-10.423	-	-	322.00	2.40
4	1.014	-11.255	-	-	500.00	184.00
5	1.023	-10.223	-	-	-	-
6	1.028	-9.484	-	-	-	-
7	1.012	-11.918	-	-	233.80	84.00
8	1.009	-12.564	-	-	522.00	176.60
9	1.005	-14.942	-	-	-	-
10	1.040	-7.070	-	-	-	-
11	1.035	-7.890	-	-	-	-
12	1.022	-7.877	-	-	8.50	88.00
13	1.034	-7.739	-	-	-	-
14	1.026	-9.309	-	-	-	-
15	1.022	-9.466	-	-	320.00	153.00
16	1.036	-7.965	-	-	329.40	32.30
17	1.032	-9.350	-	-	-	-
18	1.026	-10.189	-	-	158.00	30.00
19	1.060	-3.224	-	-	-	-
20	1.006	-4.220	-	-	680.00	103.00

ตารางที่ ข.11 แสดงข้อมูลบัสที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2 ของระบบทดสอบ
ขนาด 39 บัส (ต่อ)

Bus No.	Vm (p.u.)	Va (deg.)	Pg (MW)	Qg (MVAr)	Pd (MW)	Qd (MVAr)
21	1.036	-5.249	-	-	274.00	115.00
22	1.055	-0.505	-	-	-	-
23	1.047	-0.469	-	-	247.50	84.60
24	1.041	-7.720	-	-	308.60	-92.20
25	1.037	-6.226	-	-	224.00	47.20
26	1.044	-8.876	-	-	139.00	17.00
27	1.033	-10.266	-	-	281.00	75.50
28	1.045	-7.339	-	-	206.00	27.60
29	1.044	-5.194	-	-	283.50	26.90
30	0.983	-3.682	350	-46.26	-	-
31	1.044	0.000	670.22	405.28	9.20	4.60
32	1.021	0.683	668.94	293.64	-	-
33	1.005	1.658	601.32	96.47	-	-
34	1.036	1.261	558.96	217.51	-	-
35	1.060	4.394	651.08	255.52	-	-
36	1.060	8.608	645.27	90.62	-	-
37	1.024	1.989	640	82.65	-	-
38	1.019	0.560	666.8	-3.35	-	-
39	0.985	-16.573	743.49	22.39	1104.00	250.00
Total:			6196.09	1414.48	6150.50	1409.50

ตารางที่ ข.12 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2
ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	-267.57	10.30	269.92	-59.19	2.35	27.63
2	1	39	267.57	-10.30	-266.91	-55.10	0.66	16.49
3	2	3	341.19	-9.90	-339.80	-1.92	1.39	16.12
4	2	25	-261.10	15.24	265.52	-25.99	4.41	5.42
5	3	4	66.16	17.97	-66.09	-40.74	0.06	1.04
6	3	18	-48.36	-18.45	48.38	-4.43	0.02	0.29
7	4	5	-148.19	-86.30	148.40	75.19	0.21	3.38
8	4	14	-285.71	-56.96	286.34	52.22	0.63	10.15
9	5	6	-544.65	-149.12	545.23	151.95	0.58	7.58
10	5	8	396.24	73.94	-395.04	-73.08	1.20	16.80
11	6	7	502.37	123.24	-500.90	-113.05	1.47	22.48
12	6	11	-373.77	-19.50	374.66	14.56	0.89	10.41
13	7	8	267.10	29.05	-266.83	-34.30	0.27	3.10
14	8	9	139.87	-69.23	-139.40	35.43	0.47	7.46
15	9	39	139.40	-35.43	-139.22	-90.97	0.19	4.63
16	10	11	375.79	58.84	-375.27	-61.37	0.52	5.59
17	10	13	301.86	102.28	-301.49	-106.44	0.37	3.94
18	13	14	293.54	63.65	-292.80	-74.19	0.75	8.36
19	14	15	6.46	21.97	-6.43	-61.06	0.03	0.36
20	15	16	-313.57	-91.94	314.46	82.72	0.89	9.25
21	16	17	314.52	-33.18	-313.88	26.66	0.64	8.13
22	16	19	-570.58	-24.61	575.36	49.17	4.78	58.21
23	16	21	-334.88	25.20	335.71	-38.89	0.83	14.07

ตารางที่ ข.12 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการคำนวณ SCOPF กรณีศึกษาที่ 2
ของระบบทดสอบขนาด 39 บัส (ต่อ)

Line No.	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
24	16	24	-82.25	-87.31	82.29	80.74	0.04	0.76
25	17	18	194.04	51.77	-193.77	-62.57	0.27	3.17
26	17	27	97.58	-28.71	-97.46	-4.00	0.12	1.57
27	21	22	-649.72	-89.47	652.91	117.28	3.19	55.83
28	22	23	-1.83	75.94	1.87	-95.68	0.04	0.64
29	23	24	394.02	-1.09	-390.89	11.46	3.12	49.70
30	25	26	151.60	-61.42	-150.88	13.13	0.72	7.25
31	26	27	184.02	50.78	-183.54	-71.50	0.49	5.12
32	26	28	-61.30	-37.76	61.45	-45.69	0.15	1.64
33	26	29	-110.85	-43.16	111.50	-61.89	0.65	7.14
34	28	29	-267.45	18.09	268.38	-35.22	0.93	10.04
35	12	11	-1.07	-44.32	1.10	45.15	0.03	0.83
36	12	13	-7.43	-43.68	7.46	44.51	0.03	0.83
37	6	31	-661.02	-263.57	661.02	400.68	0.00	137.11
38	10	32	-668.94	-191.15	668.94	293.64	0.00	102.49
39	19	33	-598.75	-44.31	601.32	96.47	2.57	52.16
40	20	34	-555.94	-157.12	558.96	217.51	3.02	60.39
41	22	35	-651.08	-193.22	651.08	255.52	0.00	62.30
42	23	36	-643.38	12.16	645.27	90.62	1.89	102.78
43	25	37	-637.62	9.53	640.00	82.65	2.38	92.18
44	2	30	-350.00	69.61	350.00	-46.26	0.00	23.35
45	29	38	-663.37	70.21	666.80	-3.35	3.43	66.86
46	19	20	124.19	-51.63	-124.06	54.12	0.13	2.50
Total:							45.60	1092.65

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วิเศษฐ์ อังสุรัตน์ โกมล เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2542 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย