การจัดการความคับคั่งของระบบส่งในตลาดไฟฟ้าโดยพิจารณาการสูญเสียกำลังในสายส่ง

นายอุทัย ดีปินตา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974-53-2560-6
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSMISSION CONGESTION MANAGEMENT IN ELECTRICITY MARKETS CONSIDERING TRANSMISSION POWER LOSSES

Mr. Uthai Deepinta

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005
ISBN 974-53-2560-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดการความคับคั่งของระบบส่งในตลาดไฟฟ้าโดยพิจารณาการสูญเสียกำลังในสายส่ง
โดย	นายอุทัย ดีปินตา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

อุทัย ดีปินตา : การจัดการความคับคั่งของระบบส่งในตลาดไฟฟ้าโดยพิจารณาการสูญเสียกำลังในสายส่ง (TRANSMISSION CONGESTION MANAGEMENT IN ELECTRICITY MARKETS CONSIDERING TRANSMISSION POWER LOSSES) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ 120 หน้า. ISBN 974-53-2560-6.

โครงสร้างกิจการไฟฟ้าของหลายๆ ประเทศได้เปลี่ยนแปลงให้มีการแข่งขันมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดปัญหาเรื่องความคับคั่งในสายส่งทำให้ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงเสนอวิธีการจัดการความคับคั่งด้วยการปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เกิดปัญหาความคับคั่งโดยอาศัยความร่วมมือจากผู้ผลิตในการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและปรับเปลี่ยนการใช้งานโหลด โดยผู้จัดการสายส่งต้องเสียค่าใช้จ่ายชดเชยในการขอเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตและการขอปรับเปลี่ยนการใช้งานโหลดซึ่งต้องมีการจัดสรรราคาการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมเพื่อลดค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงของระบบและนอกจากนั้นในวิทยานิพนธ์ได้มีการพิจารณาราคาของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเข้ารวมกับราคาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องเพื่อจัดสรรให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและสะท้อนการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยวิธีการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม เพื่อเจ้าของสายส่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายจากการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงโหลดรวมถึงสายส่งสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลงได้ทำให้ระบบจะสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2548

4770546621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: CONGESTION MANAGEMENT/ ELECTRIC MARKET/ OPTIMAL POWER FLOW/ TRANSMISSION LOSS/ RE-DISPATCH

UTHAI DEEPINTA : TRANSMISSION CONGESTION MANAGEMENT IN ELECTRICITY MARKETS CONSIDERING TRANSMISSION POWER LOSSES. THESIS ADVISOR : SOTDHIPONG PHICHAISAWAT, 120 pp.

ISBN 974-53-2560-6

The most of the Electricity Supply Industries around the word are currently under the developing and restructuring stage to a competitive environment. Congestion management is one of the most tasks of the system operator in the market. This thesis describes a method of alleviating network congestion with maintaining system losses by congestion prices of transmission losses in an objective function. The proposed algorithm in the thesis solves congestion adjustment the output of generator or the load of consumer can be devided as : incremental change, decremental change and bilateral change. Generators submit their incremental and decremental bids to the system operator to patticipate in the real time dispatching and adjustment of load and solve congestion with changing bilateral contract and load curtailment. The proposed method takes into account all of those effects by using optimal power flow analysis.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical engineering Student's signature _____

Field of study Electrical engineering Advisor's signature _____

Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อยและขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และอาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบคุณ บิดามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อน ๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่ 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 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย 3

1.6 เนื้อหางานวิจัย 3

2. การจัดการความคับคั่งและโครงสร้างทั่วไปของตลาดไฟฟ้า 5

2.1 โครงสร้างทั่วไปของตลาดไฟฟ้า 5

2.1.1 หลักการตลาดกลางไฟฟ้า 6

2.1.2 โครงสร้างของตลาดแบบกระจาย 8

2.2 หลักการทั่วไปของการจัดการความคับคั่งในสายส่ง 10

2.2.1 การคิดราคาตามโหนด 11

2.2.2 การคิดราคาตามเขต 12

2.3 การจัดการความคับคั่งในตลาดต่างๆ 19

2.3.1 ตลาดไฟฟ้าในอังกฤษและเวลส์ 19

2.3.2 ตลาดไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา 21

2.3.3 ตลาดไฟฟ้าในประเทศออสเตรเลีย 28

2.3.4 ตลาดไฟฟ้าในกลุ่มนอร์เวย์ 29

2.4 การเปรียบเทียบของหลักการจัดการความคับคั่งในสายส่ง 31

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3. โครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในประเทศไทยและการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสม 34
3.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย 34
3.2 การเปลี่ยนแปลงกิจการไฟฟ้าของประเทศไทย 36
3.2.1 ระบบตลาดกลางไฟฟ้า 37
3.2.2 ระบบ NESA 40
3.2.3 ระบบ ESB 41
3.3 การคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสม 43
3.4 วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม 44
3.4.1 วิธีการวนซ้ำเพื่อหาค่าแลมบ์ดา 45
3.4.2 วิธีการใช้เกรเดียนท์ 45
3.4.3 วิธีของนิวตัน 46
3.4.4 วิธีโปรแกรมเชิงเส้น 47
3.4.5 วิธีการใช้จุดคำตอบภายใน 48
3.4.6 วิธี Sequential Quadratic Programming 49
3.5 การวิเคราะห์กำลังการไหล 51
3.6 การวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม 57
3.6.1 การคำนวณการความไวของกำลังสูญเสียในระบบ 58
3.6.2 การคำนวณความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง 60
4. แบบจำลองการจัดการความคับคั่งของสายส่งและผลการทดสอบ 65
4.1 แนวทางในการนำเสนอแบบจำลองและกระบวนวิธีในการแก้ปัญหา 65
4.1.1 โครงสร้างแบบจำลองการจัดการความคับคั่งของสายส่ง 65
4.1.2 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงราคา 68
4.1.3 การจำลองการสูญเสียในสายส่ง 70
4.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและการปรับเปลี่ยนโหลด 71
4.1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและการปรับเปลี่ยนโหลด 73

บทที่ หน้า

5. ผลการจำลองเหตุการณ์และผลการวิเคราะห์ 77
5.1 กรณีศึกษาที่ 1 การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยการ 77
พิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง
5.2 กรณีศึกษาที่ 2 การจำลองความคับคั่งโดยการพิจารณาการ 84
ปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้า
ในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง
5.3 กรณีศึกษาที่ 3 การจำลองความคับคั่งโดยการพิจารณาการ 95
ปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้า
ในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดและการอาศัยความรวมมือ
ของคู่สัญญาระหว่างผู้ผลิตและโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง
5.4 บทสรุป 102
6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ 103
6.1 สรุปผลการวิจัย 103
6.2 ข้อเสนอแนะ 105
รายการอ้างอิง 106
ภาคผนวก 108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 120

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบตลาดไฟฟ้าระหว่างระบบ NETA ของประเทศอังกฤษและเวลส์กับระบบ Power pool ของประเทศต่างๆ	32
2.2	สรุปหลักการของการจัดการความคับคั่ง การออกแบบของตลาดและการใช้ประโยชน์	32
5.1	ค่าใช้จ่าย กำลังการผลิต และกำลังสูญเสียกรณีต่างๆ	81
5.2	การพิจารณาราคาจากการจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย	81
5.3	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงต่อ 1 MW	82
5.4	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อ 1 MW	82
5.5	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริง กรณีไม่พิจารณาการช่วยเหลือของโหลด	83
5.6	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	83
5.7	ผลลัพธ์ที่พิจารณาของการจัดการความคับคั่งในกรณีต่างๆ	87
5.8	การพิจารณาราคาจากการจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาราคากำลังสูญเสีย	88
5.9	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงต่อ 1 MW	89
5.10	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อ 1 MW	89
5.11	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและโหลด	90
5.12	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	90
5.13	ผลของการจัดการความคับคั่งโดยอาศัยการช่วยเหลือของโหลด	92
5.14	พิจารณาการปรับค่า KL ที่ค่าต่างๆ	94
.15	ค่าที่ได้จากการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดในกรณีปกติ	96
5.16	ค่าที่ได้จากการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดในกรณีที่เกิดความคับคั่ง	98
5.17	ค่าที่ได้จากการจัดสรรกรณีปกติและกรณีที่มีการจัดการความคับคั่ง	99
5.18	การพิจารณาราคาเมื่อมีการจัดการความคับคั่ง	100
5.19	ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจริงกรณีปกติและกรณีที่มีการจัดการความคับคั่ง	100
5.20	ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้ารีแอกทีฟกรณีปกติและกรณีที่มีการจัดการความคับคั่ง	100
5.21	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริง	101
5.22	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงการลดใช้โหลด	101
5.23	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	101
5.24	ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงการลดใช้โหลดและกำลังการผลิตของคู่สัญญา	102
5.25	สรุปผลการจำลองทั้ง 3 กรณี	102

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	หลักการทั่วไปของตลาดกลางไฟฟ้า	6
2.2	สัญญาการจ่ายส่วนต่าง	7
2.3	ตลาดกลางไฟฟ้าและการทำสัญญาทางกายภาพ	8
2.4	การออกแบบตลาดแบบกระจาย	9
2.5	ขั้นตอนของการประเมินความคับคั่งในสายส่ง	11
2.6	ตัวอย่างการคิดวิธีตามโหนด	15
2.7	ตัวอย่างกระบวนการแยกของตลาด	17
2.8	โครงสร้างตลาดไฟฟ้าในประเทศอังกฤษและเวลส์	20
2.9	โครงสร้างตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในรัฐแคลิฟอร์เนีย	22
2.10	โครงสร้างตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในออสเตรเลีย	29
2.11	การออกแบบและการจัดการความคับคั่ง	31
3.1	โครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในประเทศไทย	35
3.2	แบ่งเขตการจ่ายไฟฟ้า	36
3.3	โครงสร้างและความสัมพันธ์ของตลาดกลางไฟฟ้า	37
3.4	โครงสร้างและความสัมพันธ์ของระบบ NESA	41
3.5	โครงสร้างและความสัมพันธ์ของระบบ ESB	42
3.6	การเคลื่อนจุดคำตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย	48
3.7	การเคลื่อนจุดคำตอบภายใน Feasible Region จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย	48
3.8	แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	56
3.9	แบบจำลองสายส่ง	60
3.10	ขั้นตอนการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสม	63
4.1	โครงสร้างของการจัดการความคับคั่งในสายส่ง ณ. เวลาจริง	65
4.2	ราคาที่พอใจจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	69
4.3	ราคาที่พอใจจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	69
4.4	ราคาที่พอใจจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงของโหลด	70
4.5	ผังแสดงลำดับของกระบวนการ	75
5.1	ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	78
5.2	พิกัดของสายส่งและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกรณีเกิดความคับคั่ง	78
5.3	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	79

ภาพประกอบ หน้า

5.4 การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 79
5.5 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่ง 79
5.6 กำลังไฟฟ้าไหลในสายส่งกรณีรวมและไม่รวมราคากำลังสูญเสียใน 80
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
5.7 กำลังสูญเสียในสายส่งกรณีรวมและไม่รวมราคากำลังสูญเสียในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 80
5.8 การผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 84
5.9 การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 85
5.10 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังได้ 85
5.11 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่ง 85
5.12 กำลังสูญเสียในสายส่งที่พิจารณาราคาการสูญเสียกรณีที่อาศัยการมีส่วนร่วม 86
ของโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปรียบเทียบกับการไม่พิจารณาราคาการสูญเสีย
5.13 กำลังสูญเสียในสายส่งกรณีอาศัยโหลดและไม่อาศัยโหลด 86
ช่วยในการจัดการความคับคั่ง
5.14 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่งมี 91
การเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเดียว
5.15 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่งมี 92
การเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการลดโหลด
5.16 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 93
5.17 การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 93
5.18 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังได้ 93
5.19 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกรณีมีการจัดการความคับคั่ง 97

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลายๆ ประเทศได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าจากเดิมที่มีการผูกขาดด้วยภาครัฐบาล แต่ในปัจจุบันกิจการไฟฟ้ามีการร่วมลงทุนของภาคเอกชนมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการแข่งขันของกิจการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและพบว่าหลังจากมีการปรับโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังที่กำลังดำเนินไปในหลายๆ ประเทศ เรื่องที่ได้รับความสนใจและกล่าวถึงเรื่องหนึ่งคือ การจัดการความคับคั่งในสายส่งเพราะถ้าไม่มีการจัดการความคับคั่งในสายส่งจะทำให้เกิดความเสียหายกับระบบ เช่น ทำให้ไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง (Cascade outage) หรือทำให้เกิดการสูญเสียโหลด (Loss of load) เป็นต้น

ซึ่งการจัดการความคับคั่งของสายส่งโดยทั่วไปใน [1] สามารถทำด้วยการควบคุมการทำงานของ FACTS (Flexible AC Transmission System), ควบคุมแท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือปลดสายส่งออก แต่ในความเป็นจริงยังมีวิธีทางเศรษฐศาสตร์ที่สามารถนำมาช่วยในการจัดการความคับคั่งของสายส่งโดยการอาศัยกลไกลทางการตลาดด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงการส่งกำลังของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องใหม่ (Redispatch of generation) และการขอความร่วมมือในการปรับเปลี่ยนโหลด (Curtail of loads)

เนื่องจากในกรณีที่เกิดความคับคั่งในสายส่งขึ้นจะต้องมีการจัดการอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อให้ระบบสามารถดำรงอยู่ได้โดยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยการปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลบางส่วนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เกิดปัญหาเพื่อที่จะสามารถทำให้ระบบใช้งานอยู่ได้ ดังนั้นผู้จัดการสายส่งจำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้ผลิตในการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตจากของเดิมที่ได้ตกลงไว้ แต่การปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตแต่ละครั้งต้องมีต้นทุนค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ซึ่งผู้จัดการสายส่งจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายชดเชยให้ในการขอเพิ่มหรือลดกำลังการผลิต ถ้าผู้จัดการสายส่งดังกล่าวมีการจัดสรรให้ต้นทุนการเปลี่ยนแปลงมีความเหมาะสมผู้จัดการสายส่งก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงของระบบลงได้ โดยวิทยานิพนธ์ได้พัฒนาแนวคิดจาก [2-6] ที่มีการพิจารณาผลทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเพื่อลดความคับคั่งในสายส่ง แต่งานวิจัยในอดีตได้พิจารณาการจัดการความคับคั่งของสายส่งโดยพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่านั้น แต่ยังไม่ได้มีการพิจารณาเรื่องของต้นทุนกำลังสูญเสียในสายส่ง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอให้มีการพิจารณาต้นทุนของกำลังการสูญเสียเข้า

รวมกับต้นทุนการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเพื่อจัดสรรให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตในปริมาณที่เหมาะสม ด้วยวิธีการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม (Optimal Power Flow : OPF) เพราะถ้าผู้จัดการสายส่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดก็หมายความว่าเจ้าของสายส่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการขอให้มีการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกำลังการสูญเสียในสายส่งก็ลดลงด้วย การที่ผู้จัดการสายส่งสามารถลดกำลังสูญเสียในระบบสายส่งได้นั้นจะทำให้ระบบสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น และในวิทยานิพนธ์ได้มีการเพิ่มความยืดหยุ่นในการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ความสำคัญกับกำลังสูญเสียกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตเพื่อแก้ไขปัญหาความคับคั่งด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ยังมีการเสนอการจัดการความคับคั่งโดยการอาศัยความร่วมมือจากลูกค้าที่สามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานของโหลดเพื่อช่วยบรรเทาความคับคั่งอันส่งผลให้การแก้ปัญหามีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์กฎทางการตลาดในการแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่ง
2. เพื่อศึกษากระบวนวิธีที่ใช้ในการจัดการความคับคั่งในสายส่งด้วยวิธีกำลังการไหลที่เหมาะสม
3. เพื่อศึกษาวิธีจัดการความคับคั่งในสายส่งโดยพิจารณาต้นทุนกำลังการสูญเสียของสายส่ง

1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

1. ศึกษาการจัดการความคับคั่งและโครงสร้างของตลาดไฟฟ้า
2. ศึกษากระบวนวิธีในการจัดการความคับคั่งในสายส่งไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาทำการจริง
3. ศึกษากระบวนวิธีที่ใช้ในการจัดการความคับคั่งในสายส่งด้วยวิธีกำลังการไหลที่เหมาะสม
4. มีการพิจารณาการจัดการความคับคั่งในสายส่งด้วยวิธีปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตเท่านั้น จะละเลยการจัดการด้วยอุปกรณ์ FACTS, การควบคุมแท็ปหม้อแปลง และการปลดสายส่ง

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีวิจัย

1. ศึกษาการจัดการความคับคั่งและโครงสร้างทั่วๆไปของตลาดไฟฟ้า
2. ศึกษาการจัดการความคับคั่งในสายส่งด้วยวิธีทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเปลี่ยนแปลงการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด
3. ศึกษาการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาความคับคั่ง
4. ศึกษาการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATPOWER เพื่อจำลองเหตุการณ์ในการทดสอบและวิเคราะห์การจัดการความคับคั่งในกรณีต่างๆ
5. วิเคราะห์และสรุปผลวิทยานิพนธ์
6. เรียบเรียง, พิมพ์ และจัดเข้ารูปเล่มวิทยานิพนธ์เพื่อเสนอต่อคณะกรรมการ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการจัดการความคับคั่งในสายส่งในตลาดไฟฟ้า
2. ทำให้ได้แนวทางการพัฒนาความคับคั่งในสายส่งที่มีประสิทธิภาพโดยอาศัยกลไกและกฎของตลาด
3. ใช้อ้างอิงในการวางแผนและเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในระบบปฏิบัติการจริงในระบบไฟฟ้า

1.6 เนื้อหางานวิจัย

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 โครงสร้างโดยทั่วไปของตลาดไฟฟ้า หลักการโดยทั่วไปของการจัดการความคับคั่งของสายส่ง วิธีที่ใช้ในการจัดสรรความจุของสายส่ง และวิธีที่ใช้ในการลดปัญหาความคับคั่งในสายส่ง ตัวอย่างของการจัดการความคับคั่งในสายส่งของตลาดไฟฟ้าของสหรัฐอเมริกา (PJM, แคลิฟอร์เนีย, นิวอิงแลนด์), นอร์เวย์, สหราชอาณาจักร และออสเตรเลีย

บทที่ 3 ภาพรวมและโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในประเทศไทยและนโยบายที่มีการพัฒนาตั้งแต่เริ่มเกิดปัญหาเศรษฐกิจในปี 2540 จนถึงปัจจุบัน ทฤษฎีการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสมและการวิเคราะห์กำลังการไหล

บทที่ 4 แนวทางในการจำลองการจัดการความคับคั่งในสายส่งของวิทยานิพนธ์, กระบวนการในการแก้ปัญหา

บทที่ 5 การจำลองเหตุการณ์แบ่งเป็น 3 กรณี คือ

1. การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยการพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง
2. การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้าในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง
3. การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้าในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดและการอาศัยความรวมมือของคู่สัญญาระหว่างผู้ผลิตและโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่งและผลการวิเคราะห์

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุป, ประโยชน์ที่ได้และข้อดี-ข้อเสียของวิธีการที่นำเสนอพร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การจัดการความคับคั่งและโครงสร้างทั่วไปของตลาดไฟฟ้า

การจัดการความคับคั่งเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเรื่องหนึ่งหลังจากหลายประเทศมีการปรับโครงสร้างกิจการระบบไฟฟ้ากำลังให้มีการแข่งขันกันมากขึ้นเพื่อให้ระบบมีความมั่นคงและมีคุณภาพดีขึ้นภายใต้กลไกตลาดและข้อกำหนดต่างๆ ในตลาดที่พัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งในประเทศไทยนั้นถึงแม้ว่ายังไม่มีความแน่ชัดในกฎของการตลาด แต่การศึกษาในเรื่องของการจัดการความคับคั่งนับเป็นเรื่องที่ควรให้ความสนใจเพื่อเป็นการเตรียมความรู้และเตรียมความพร้อมที่จะเผชิญกับปัญหาความคับคั่งที่จะเกิดขึ้นในอนาคตโดยอาศัยความยืดหยุ่นของกลไกตลาดเพื่อให้การแก้ปัญหาดังกล่าวมีประสิทธิภาพ ในอนาคตอาจมีการเชื่อมโยงระบบในภูมิภาคเข้าด้วยกันเพื่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าระหว่างประเทศหรือกลุ่มประเทศซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาความคับคั่งตรงบริเวณขอบรอยต่อของภูมิภาคตามมาได้

สำหรับการจัดการความคับคั่งของสายส่งต้องอาศัยความความร่วมมือจากทุกๆ ส่วนในตลาดไฟฟ้าโดยการแก้ปัญหาต้องขึ้นอยู่กับโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของแต่ละตลาดและในบทนี้จะนำเสนอให้เห็นโครงสร้างโดยทั่วๆ ไปของการจัดการความคับคั่งในสายส่ง ซึ่งทั่วๆ ไปการจัดการความคับคั่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ

1. การคิดราคาเท่ากันทั้งหมด (Uniform pricing)
2. การคิดราคาตามโหนด (Nodal pricing)
3. การคิดราคาตามเขต (Zonal pricing)

2.1 โครงสร้างทั่วไปของตลาดไฟฟ้า (Generic market structures)

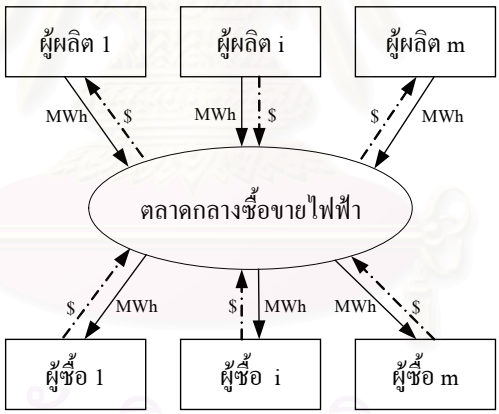
โดยทั่วไปลักษณะการออกแบบของตลาดไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะทางโครงสร้างของแต่ละตลาดและส่วนมากตลาดโดยทั่วๆ ไปมีการจัดการด้วยหลักการของตลาดกลางไฟฟ้าและหลักการของตลาดไฟฟ้าแบบกระจาย

2.1.1 หลักการตลาดกลางไฟฟ้า (Power pool) [8, 9]

การจัดการด้วยหลักการของตลาดกลางไฟฟ้าจะแบ่งการจัดสรรออกเป็น 2 แบบ คือ ตลาดไฟฟ้าที่อาศัยการทำสัญญาทางการเงินและตลาดกลางไฟฟ้าอาศัยการทำสัญญาทางกายภาพ

2.1.1.1 ตลาดไฟฟ้าที่อาศัยการทำสัญญาทางการเงิน

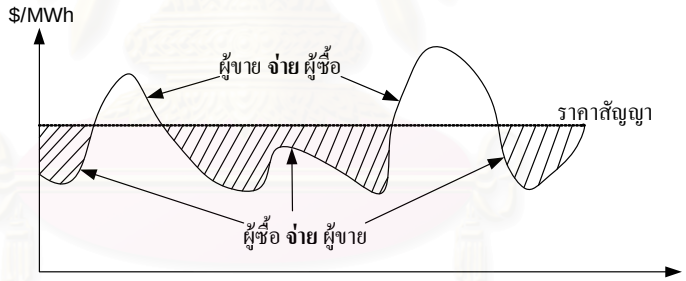
ลักษณะโดยทั่วไปของตลาดกลางไฟฟ้าประกอบด้วยตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า คือ องค์กรหรือหน่วยงานใดๆ ที่ถูกจัดตั้งมาเพื่อการติดต่อประสานงานเป็นตัวกลางในการดำเนินการซื้อขายไฟฟ้าอย่างเป็นระบบเพื่อคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นหลัก โดยมีดำเนินการจัดสรรกำลังไฟฟ้า (Power dispatch), การจัดเตรียมระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉิน (Backup supplies), การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า (Power support & voltage regulation), และกำลังผลิตไฟฟ้าสำรอง (Spinning reserve) ดังแสดงหลักการทั่วไปๆ ตามรูปที่ 2.1

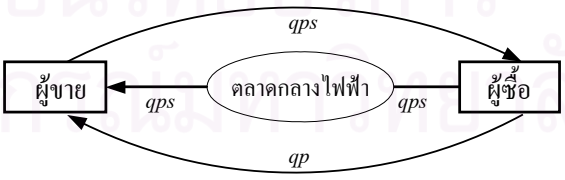


รูปที่ 2.1 หลักการทั่วไปของตลาดกลางไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าไม่มีการซื้อขายโดยตรงระหว่างผู้ขายและลูกค้าแต่ระบบจะมีการปฏิบัติการด้วยศูนย์กลางที่อาศัยการมีส่วนร่วมจากผู้ผลิตและผู้ใช้ในการเสนอราคาให้กับผู้ปฏิบัติการของตลาดกลาง (Pool operator) เพื่อคำนวณราคาที่เหมาะสม ในการดำเนินการของผู้ปฏิบัติการของตลาดกลางจะดำเนินการให้สอดคล้องกับตลาดกลางเพื่อให้ประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการภายใต้ความเพียงพอของกำลังการผลิตและข้อจำกัดต่างๆของสายส่ง ในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดทางกายภาพจะ

อาศัยการทำสัญญากันเองในการส่งผ่านภายใต้ตลาดกลาง ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ได้รับความสนใจคือการพิจารณาความเสี่ยง (Hedging price risks) โดยวิธีนี้จะใช้ประโยชน์จากการคิดสัญญาในการจ่ายส่วนต่าง (Contracts For Differences : CFD) คือเป็นสัญญาทางการเงินที่ไม่เกี่ยวกับการจัดส่งกระแสไฟฟ้าซึ่งผู้ซื้อจะจ่ายค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำสัญญาไว้กับผู้ขาย โดยกรณีที่ราคาตลาดกลางต่ำกว่าราคาที่ทำสัญญาที่ผู้ซื้อจะจ่ายส่วนต่างระหว่างราคาตลาดกลางและราคาที่ทำสัญญาให้แก่ผู้ขายและกรณีที่ราคาตลาดกลางสูงกว่าราคาที่ทำสัญญาผู้ขายจะจ่ายส่วนต่างระหว่างราคาตลาดกลางและราคาที่ทำสัญญาให้แก่ผู้ซื้อ เช่น สมมุติมีการค้าขายระหว่างสองฝ่ายด้วยการทำสัญญากันสำหรับปริมาณของ q ที่ราคาในอนาคต p เมื่อนำไปคิดใน CFD ซึ่งในกรณีที่ราคาตลาดกลางต่ำกว่าราคาที่ทำสัญญาผู้ซื้อจะต้องมีการจ่ายเงินให้ผู้ขายที่ราคา $q(p - p_s)$ โดยที่ p_s คือราคาตลาดกลาง และ p คือราคาของสัญญาที่ทำไว้ และในกรณีที่ราคาตลาดกลางสูงกว่าราคาที่สัญญาผู้ขายจะต้องมีการจ่ายเงินให้ผู้ซื้อที่ราคา $q(p_s - p)$ จากรูปที่ 2.2 เป็นการแสดงให้เห็นถึงราคาของการส่งผ่านระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายและผู้ปฏิบัติการของศูนย์ฯ โดยการใช้ประโยชน์จาก CFD จะอยู่ภายใต้ตลาดที่ทำการในช่วงเวลานั้น (Spot market) เพื่อแยกความไม่แน่นอนของราคาในช่วงทำการนั้น (Spot price) ลักษณะของตลาดที่ทำการแบบนี้มีใช้ในประเทศสิงคโปร์, ออสเตรเลีย เป็นต้น

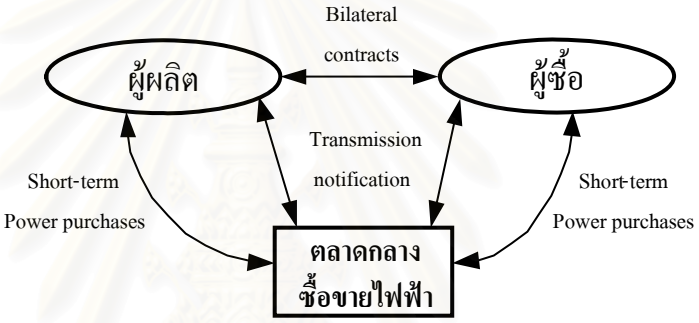




รูปที่ 2.2 สัญญาการจ่ายส่วนต่าง

2.1.1.2 ตลาดกลางไฟฟ้าอาศัยการทำสัญญาทางกายภาพ

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการแสดงโครงสร้างของตลาดที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่มีการชำระเงินระหว่างคู่สัญญาโดยอาศัยกลไกของตลาดกลางไฟฟ้าส่วนในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาเกี่ยวกับข้อจำกัดของลักษณะทางกายภาพ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ความสอดคล้องกับการส่งจ่ายแบบคู่สัญญาโดยอาศัยรายละเอียดเกี่ยวกับการไหลของพลังงานที่ได้รับจากตลาดกลางซึ่งผู้ที่ทำหน้าที่ปฏิบัติการในตลาดกลางจะต้องทำการพิจารณาจัดสรรกำลังการผลิตให้เหมาะสม



รูปที่ 2.3 ตลาดกลางไฟฟ้าและการทำสัญญาทางกายภาพ

ลักษณะโครงสร้างของตลาดแบบนี้นิยมใช้อ้างอิงในการออกแบบตลาด (Standard Market Design : SMD) ซึ่งมีการนำเสนอโดย Fereral Energy Regulatory Commission (FERC) และมีการนำไปใช้ในตลาด PJM, ตลาดนิวอิงแลนด์, ตลาดนิวยอร์ค, และตลาดใหม่ในรัฐแคลิฟอร์เนีย

2.1.2 โครงสร้างของตลาดแบบกระจาย (Decentralized market structures) [8]

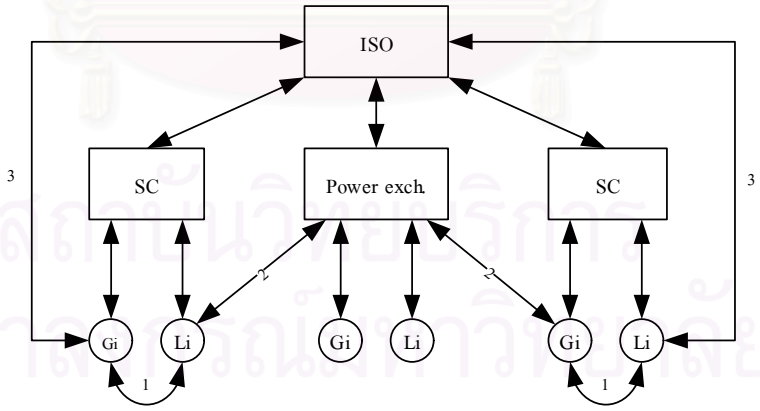
โครงสร้างของตลาดในข้อ 2.1.1 และข้อ 2.1.2 เป็นการดำเนินการโดยอาศัยหลักการของตลาดกลางไฟฟ้าเพื่อสร้างความเชื่อถือได้และความเข้มแข็งให้กับระบบ แต่วิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหามีความหลากหลายขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ โดยทั่วไปการดำเนินการของตลาดล่วงหน้าหนึ่งวันจะแยกจากระบบโครงข่ายสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระจะทำการในช่วงเวลาล่วงหน้าหนึ่งชั่วโมงและในช่วงเวลาทำการจริงเพื่อให้ระบบเกิดความสมดุลและลดปัญหา

ความคับคั่งในสายส่ง ส่วนการดำเนินการในตลาดล่วงหน้าหนึ่งวันจะทำแยกออกต่างหากจากนี้เพื่อจะได้กำหนดการทำงานร่วมกัน (Scheduling Coordinators : SC) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช่วยกันจ่ายโหลดให้กับลูกค้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการคิดราคาในส่วนของการบริการเพื่อความสมดุลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความต้องการของสมาชิกในตลาดซึ่งต้องอาศัยการมีส่วนร่วมในการส่งรายระเอียดให้กับศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระเพื่อที่จะทำการจ่ายเงินทดแทนในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจากการอาศัยความร่วมมือจากผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า

โดยทั่วไปการค้าไฟฟ้าในตลาดแบบกระจายตัวนี้จะประกอบด้วยโครงสร้างคือ

1. ผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องชำระค่าบริการของสัญญาทางกายภาพโดยมีลำดับที่ชัดเจนในการกำหนดการทำงานร่วมกันของข้อมูลทางกายภาพ
2. ผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องค้าพลังงานในตลาดล่วงหน้าหนึ่งวันที่ในส่วนของศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด (Power exchange)
3. ผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องมีส่วนร่วมในการทำให้ระบบเกิดความสมดุลโดยผ่านศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระ

การดำเนินการของตลาดแบบกระจายจะอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง SC, Power exchenge, ISO เพื่อนำข้อมูลต่างๆ มาใช้ร่วมกัน ส่งผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพซึ่งตลาดแบบกระจายนี้มีใช้ในประเทศเยอรมันนีและกลุ่มประเทศนอร์ดิคที่มีการนำข้อมูลจากศูนย์ปฏิบัติการตลาดมาใช้ร่วมกัน



รูปที่ 2.4 การออกแบบตลาดแบบกระจาย

2.2 หลักการทั่วไปของการจัดการความคับคั่งในสายส่ง [8, 9, 22, 23]

การจัดการและเพิ่มความสามารถของสายส่งเป็นเรื่องที่มีความสำคัญกับตลาดไฟฟ้าเรื่องหนึ่ง โดยการจัดการความคับคั่งในสายส่งจะพิจารณารวมผลทุกอย่างที่ส่งผลกับความคับคั่งในสายส่งซึ่งการพิจารณาความคับคั่งในสายส่งนั้นจะพิจารณาในช่วงเวลาที่ตลาดทำการจริง

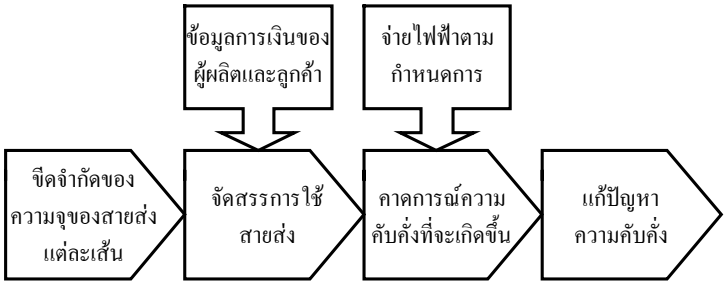
วิธีที่ใช้ในการจัดการความคับคั่งในสายส่งสามารถทำได้โดย

- วิธีการจัดสรรการใช้สายส่ง (Capacity allocation) ซึ่งเป็นการจัดสรรการใช้สายส่งสำหรับส่งพลังงานไฟฟ้าภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ของระบบการจัดสรรนี้สามารถทำได้โดยวิธีการคิดราคาแบบตามโหนดและแบบตามเขต
- วิธีเพื่อลดปัญหาความคับคั่งในสายส่ง (Capacity alleviation) ณ ช่วงเวลาทำการจริงโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง

ตลาดกลางไฟฟ้าจะนำเอาวิธีทั้งสองนี้ไปใช้ในการจัดการความคับคั่งในสายส่ง ณ ช่วงเวลาทำการจริงของตลาด

การจัดการความคับคั่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ความเท่าเทียมกัน โดยต้องมีความเป็นกลางมีความโปรงใสและได้รับความร่วมมือจากทุกฝ่ายทั้งจากลูกค้าและผู้ผลิต
- ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยต้องมีวิธีที่จะกระตุ้นทั้งระบบการผลิต, ลูกค้า รวมถึงการดำเนินการของระบบโครงข่ายสายส่งเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดต่างๆ อย่างคุ้มค่า
- ความโปร่งใสของตลาด โดยต้องมีเครื่องมือที่สร้างความโปร่งใสในทุกส่วนของระบบ
- มีความยืดหยุ่น โดยต้องมีการรับข้อมูลมาจากหลายแหล่งข้อมูลโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและทันต่อเหตุการณ์
- มีความสามารถในการเชื่อมต่อกับระบบอื่น โดยในระบบการทำงานจริงจะต้องอาศัยระบบที่อยู่รอบๆ มาช่วยในกรณีที่เกิดปัญหากับระบบของเรา



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนของการประเมินความคับคั่งในสายส่ง

จะพบว่าโดยทั่วไปกระบวนการในการจัดสรรเพื่อบรรเทาความคับคั่งจะมีพื้นฐานสำคัญ 2 อย่าง คือ การบริการและการคาดการถึงเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นตามกฎเกณฑ์ในอนาคต ดังแสดงตามขั้นตอนการประเมินความคับคั่งจากรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถทำการประเมินเพื่อจัดสรรกำลังการผลิตด้วยวิธีดังต่อไปนี้

2.2.1 **การคิดราคาตามโหนด (Nodal pricing)**

ราคาตามโหนดคือราคาต่อหน่วยสุดท้ายของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง ณ บัสหนึ่ง ๆ ซึ่งแต่ละบัสจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกำลังการผลิตหน่วยสุดท้ายนั้น ซึ่งจะพบว่าราคาตามโหนด ณ แต่ละบัสมีความสอดคล้องกับการจัดสรรกำลังการผลิต โดยสามารถแบ่งออกเป็นราคาอ้างอิงของระบบ (System charge) ราคากำลังการสูญเสีย (Loss charge) และราคาของความคับคั่ง (Congestion charge) โดยทั่วไปราคาอ้างอิงของระบบจะเป็นราคาไฟฟ้าหลัก ส่วนราคากำลังการสูญเสียและราคาความคับคั่งจะเป็นราคาไฟฟ้าในส่วนที่แปรตามการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า ณ บัสที่มีผลต่อกำลังการสูญเสียและความคับคั่ง

การคิดราคาตามโหนดจะอาศัยการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่มีส่วนร่วมกันในการนำเสนอเพื่อจัดสรรความจุของสายส่ง ซึ่งการนำเสนอราคาของผู้ผลิตและผู้ใช้มีการคิดราคาที่แต่ละโหนดจากตลาดกลางเพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อทั้งสองเข้าด้วยกันและศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระจะทำหน้าที่ในการจัดสรรเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดภายใต้ข้อจำกัดต่างๆโดยที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระจะทำหน้าที่แก้ปัญหาดัง (2.1)

$$\max : \sum_k B(d_k) - \sum_j C(g_j)$$

$$\begin{aligned} &\textit{subject to} \\ &\sum_k d_k + losses - \sum_j g_j = 0 \\ &|z_i| \le z_i^{\max} \\ &g_j \le g_j^{\max} \end{aligned} \qquad (2.1)$$

โดยที่

d_k	คือ ความต้องการที่โหนด k
g_j	คือ การผลิตกำลังไฟฟ้าที่โหนด k
$B(d_k)$	คือ ผลประโยชน์ของลูกค้า
$C(g_k)$	คือ ต้นทุนในการผลิต
$g_j^{\max}$	คือ ความสามารถสูงสุดในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่โหนด k
z_i	คือ กำลังไฟฟ้าที่สายส่ง i
$z_i^{\max}$	คือ ความสามารถสูงสุดที่ไหลระหว่างสายส่ง i

จาก (2.1) จะพบว่าส่วนที่ได้ผลประโยชน์สูงสุดคือการที่ลูกค้าใช้ไฟฟ้าที่มีต้นทุนน้อยในการผลิตภายใต้ข้อจำกัด 3 ข้อ คือ

- ความสมดุลของกำลังไฟฟ้า
- ข้อจำกัดของการไหล
- ข้อจำกัดในการผลิตไฟฟ้า

จากนั้นจะนำมาแก้ปัญหาด้วยวิธีกำลังการไหลที่เหมาะสมโดยใช้ Lagrangean ดังแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} &\max : \sum_k B(d_k) - \sum_j C(g_j) \\ &-\mu_e(\sum_k d_k + losses - \sum_j g_j) \\ &-\mu_i^{os}(|z_i| - z_i^{\max}) \\ &-\mu_j^{\max}(g_j - g_j^{\max}) \end{aligned}$$

จากสมการ Langrangean สามารถอธิบายสำหรับราคาตามโหนดได้ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$p_k = \mu_e \left[1 + \frac{\delta losses}{\delta d_k} \right] + \sum_i \mu_i^{os} \frac{\delta z_i}{\delta d_k} \qquad (2.2)$$

จะพบว่าค่า μ_i^{os} สามารถหามาจากแก้ปัญหาค่าเหมาะสมเรียกว่าตัวคูณ Lagrangean ซึ่งเป็นตัวที่สามารถบ่งบอกถึงผลกระทบต่อความสามารถในการจุของสายส่ง โดยที่การเปลี่ยนของราคาหน่วยสุดท้ายในกรณีที่ไม่ข้อจำกัดจะมีค่าตัวคูณเท่ากับศูนย์ แต่ในกรณีที่มีข้อจำกัดเกิดขึ้นจะต้องมีการเพิ่มหรือลดของค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มความสามารถของความจุของสายส่งโดยค่าตัวคูณจะได้มาจากการแก้สมการซึ่งถ้ามีข้อจำกัดของราคาหนาแน่นความสามารถความจุของสายส่งจะลดลง แต่ถ้ามีข้อจำกัดของราคาเบาบางความสามารถของความสามารถความจุของสายส่งจะเพิ่มขึ้น และค่าตัวคูณจะตั้งเป็นค่าเริ่มต้นของราคาซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่เกิดจากความสมัครใจในการจ่ายเพื่อเพิ่มความสามารถในการจุซึ่งราคานี้จะเป็นการสะท้อนราคาที่ดีโดยค่า μ_i^{os} จะมีอิทธิพลกับสมาชิกในตลาด ซึ่งอาศัยการประเมินจากราคาหน่วยสุดท้ายที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงส่งผลให้เกิดประโยชน์ในเรื่องความจุของสายส่งโดยราคาตามโหนด (p_k) จะเป็นการรวมราคาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งที่จะส่งผลให้เกิดการกระตุ้นให้เกิดการลงทุนผลิตไฟฟ้าในบัสที่ได้รับผลกระทบ

โดยราคาไฟฟ้าโหนดใน (2.2) สามารถแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ราคาอ้างอิงของระบบ ราคากำลังการสูญเสีย และราคาความคับคั่ง ดังนี้

$$p_k = system\ charge + loss\ charge + congestion\ charge \qquad (2.3)$$

จาก (2.3) ราคาในส่วนแรกของสมการเป็นราคาอ้างอิงของระบบโดยการคำนวณราคาในส่วนนี้จะรับข้อมูลขาเข้าซึ่งประกอบด้วยปริมาณและราคาไฟฟ้าที่เสนอจากบริษัทผลิตไฟฟ้าและบริษัทผู้ค้าปลีกไฟฟ้า จากนั้นศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าจะทำการสร้าง Supply curve และ Demand curve แล้วจึงทำการหาจุดตัดเพื่อกำหนดเป็นจุดที่ตกลงทำการซื้อขาย โดยผู้ผลิตที่เสนอขายต่ำกว่าหรือเท่ากับราคา ณ จุดตัดจะได้รับคัดเลือกให้จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ตลาดกลาง โดยได้รับราคาไฟฟ้าตามราคา ณ จุดตัดซึ่งจะใช้เป็นราคาอ้างอิงของระบบตาม (2.3) นั้นเอง ส่วนผู้ซื้อหรือบริษัทค้าปลีกไฟฟ้าที่เสนอซื้อสูงกว่าหรือเท่ากับราคาอ้างอิงของระบบจะได้รับสิทธิในการใช้ไฟฟ้าตามปริมาณที่เสนอดังกล่าวโดยจะต้องชำระเงินค่าพลังงานไฟฟ้าที่ราคาอ้างอิงของระบบเช่นกัน

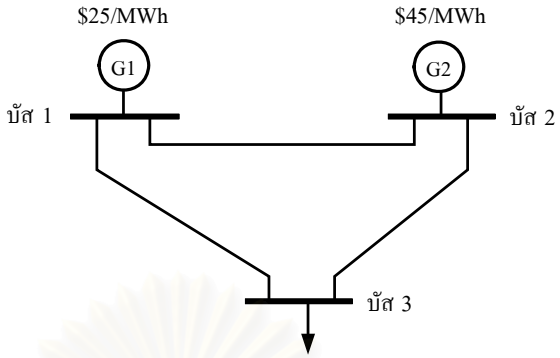
ราคาในส่วนที่ 2 คือราคาการสูญเสียซึ่งเป็นราคาที่สะท้อนถึงต้นทุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเพิ่มปริมาณไฟฟ้าที่ไหลเข้า ณ โหนดใดๆ ซึ่งค่าราคากำลังการสูญเสียนี้เป็นผลคูณของ Net injected factor และราคาอ้างอิงของระบบ

ราคาในส่วนที่ 2 คือราคาความคับคั่งเป็นราคาที่สะท้อนถึงต้นทุนเนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าที่เกินขีดจำกัดของสายส่งโดยมีหลักการคำนวณอย่างง่ายคือ ทำการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและทำการตรวจสอบว่าเกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของสายส่งบ้างหรือไม่ถ้าไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของสายส่งเส้นใดค่าราคาความคับคั่งสำหรับทุกโหนดจะมีค่าเท่ากับศูนย์และค่าการจัดสรรจะมีค่าคงเดิม แต่ถ้าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของสายส่งทางศูนย์ควบคุมอิสระจะจัดสรรกำลังไฟฟ้าใหม่ (Re-dispatch) เพื่อให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ โดยที่ต้นทุนเนื่องจากการจัดสรรกำลังไฟฟ้าใหม่นี้จะถูกกระจายให้แก่ผู้มีส่วนร่วมในตลาดผ่านราคาความคับคั่ง ซึ่งใช้หลักการว่าผู้มีส่วนร่วมในตลาดที่มีส่วนก่อให้เกิดปัญหาการส่งผ่านไฟฟ้าติดขัดจะต้องจ่ายเงินสำหรับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น และในทางกลับกันสำหรับผู้ที่มีส่วนร่วมในตลาดที่มีส่วนแก้ไขปัญหาการส่งผ่านไฟฟ้าจะได้รับผลตอบแทนในการลดค่าใช้จ่ายเนื่องจากการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของสายส่ง

ในกรณีที่การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของสายส่งแล้วศูนย์ควบคุมอิสระทำการจัดสรรกำลังไฟฟ้าใหม่ซึ่งจะทำให้เกิดต้นทุนต่อระบบ 2 ส่วนดังนี้

1. ค่า Constrained Down Payment : CDP เป็นเงินที่จ่ายชดเชยให้บริษัทผลิตไฟฟ้าที่ถูกศูนย์ควบคุมอิสระสั่งให้ลดกำลังการผลิตลงเนื่องจากผลของการส่งผ่านไฟฟ้าติดขัด ซึ่งค่า CDP นี้จะคำนวณจากผลคูณของปริมาณไฟฟ้าที่ถูกสั่งให้ลดและผลต่างระหว่างราคา ณ โหนดกับราคาไฟฟ้าที่เสนอขายที่สอดคล้องกับปริมาณไฟฟ้าที่ถูกสั่งให้ลดการผลิต
2. ค่าไฟฟ้าที่ศูนย์ควบคุมอิสระสั่งให้ผลิตเพิ่มเติมเป็นเงินที่จะจ่ายให้แก่บริษัทผลิตไฟฟ้าที่ศูนย์ควบคุมอิสระสั่งให้ผลิตไฟฟ้าเพิ่มเติมเพื่อใช้แก้ปัญหาการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของสายส่ง เงินจำนวนนี้จะคำนวณจากผลคูณของปริมาณไฟฟ้าที่ถูกสั่งให้ผลิตเพิ่มและราคาไฟฟ้าเสนอขายที่สอดคล้องกับปริมาณที่ได้รับการสั่งให้ผลิตเพิ่ม

จากทฤษฎีข้างต้นเพื่อแสดงให้เห็นแนวคิดในการแก้ปัญหา จะพิจารณาตัวอย่างจากระบบ 3 บัส ในการแสดงการคิดราคาด้วยวิธีแบบโหนด ดังรูปที่ 2.6 ในที่นี้ขอแสดงหน่วยเงินเป็นดอลล่าร์สหรัฐ โดยที่ตำแหน่งของบัส 1 และบัส 2 มีราคากำลังการผลิตเท่ากับ 25 $/MWh และ 45 $/MWh ตามลำดับ ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งไม่เกิดข้อจำกัดขึ้นราคาของทุกโหนดจะมีค่าเท่ากันทุกบัสนั้นก็หมายความว่าราคาขายพลังงานที่บัส 1 เท่ากับ 25 $/MWh โดยที่ไม่เกิดการจัดสรรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการคิดวิธีตามโหนด

ถ้าให้ความต้องการไฟฟ้าที่บัส 3 มีค่าเท่ากับ 1,000 MW และขอบเขตของการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 มีค่าสูงสุด 750 MW และเครื่องที่ 2 มีค่าสูงสุด 500 MW เพื่อให้เกิดความความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดเครื่องที่ 1 จะต้องผลิต 750 MW และเครื่องที่ 2 ก็จ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหลือโดยระบบทั้งหมดมีการคิดราคาเท่ากับ 45 $/MWh ในการคิดราคาของเครื่องที่ 1 จะได้กำไร [(45 $-25 $)x750]=1,5000 $ โดยเครื่องที่ 2 จะไม่ได้กำไร (กำไรในที่นี้หมายถึงผลประโยชน์เพิ่มเติม) เนื่องจากคิดที่ราคาหน่วยสุดท้าย

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ค่าความจุของสายส่งระหว่างบัส 1, บัส 2 เกิดความคับคั่งโดยที่ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งมีค่าเท่ากันจะได้ค่าราคาที่บัส 3 คือ 35 $/MWh และราคาที่บัส 1 และบัส 2 เท่ากับราคาหน่วยสุดท้ายของแต่ละบัสตามลำดับ โดยผู้ผลิตไม่มีกำไร และถ้าโหลดที่บัส 1 และบัส 2 สามารถป้อนเข้าจาก local generator เท่านั้นการเพิ่มกำลังการผลิตจากเครื่องที่ 1 และ 2 จะทำให้เกิดข้อจำกัดทางอุณหภูมิจึงทำให้สายส่งเกิดความคับคั่งขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดการเพิ่มกำลังการไหลของสายส่งจากบัส 1 และ 2 ขึ้นอีก ต้องมีการเพิ่มความต้องการของโหลดขึ้นในกรณีที่บัสที่ 3 ต้องการเพิ่มกำลัง 1 MW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 และ 2 ต้องเพิ่มเครื่องละ 0.5 MW จึงได้ราคาของพลังงานไฟฟ้าที่บัสที่ 3 เท่ากับ [0.5 x 25 $/MWh + 0.5 x 45 $/MWh] =35 $/MWh

ถ้าเกิดในกรณีนี้มีรายได้จากสายส่ง 5,000 $ จะพบว่าศูนย์ควบคุมอิสระจะทำการซื้อพลังงานมาในราคา [25 $/MWh x 750 MWh + 45 $/MWh x 250 MWh] = 30,000 $ และจะขายในราคา 35,000 $

โดยทั่วไปในการแก้ไขปัญหาเพื่อจัดการความคับคั่งในสายส่ง มี 2 วิธี คือ

1. ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระหรือเจ้าของสายส่งมีการลงทุนเพิ่มให้สายส่งมีความเพียงพอ
2. อาศัยความร่วมมือของสมาชิกในตลาดไฟฟ้าเพื่อร่วมกันหาวิธีในการจัดสรรกำลังการผลิตเพื่อบรรเทาปัญหา

การคิดราคาตามโหนดจะเป็นการจัดสรรกำลังการผลิตเพื่อให้ได้ราคาเหมาะสมและก่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุดภายใต้ขอบเขตของการผลิตกำลังไฟฟ้าและโครงข่ายสายส่ง โดยแนวคิดหลักจะต้องมีการจัดสรรข้อมูลต่างๆให้มีค่าที่เหมาะสมซึ่งข้อมูลเหล่านี้ต้องมีความง่ายและมีความเที่ยงตรง สำหรับโครงสร้างของตลาดซึ่งมีการแข่งขันอย่างอิสระของการเสนอราคาจากผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าโดยมีการทำผ่านศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระมีการจัดสรรกำลังการผลิตโดยมีการพิจารณาในเรื่องของความมั่นคงของระบบ

2.2.2 การคิดราคาตามเขต (Zonal pricing)

การคิดราคาตามเขตมีความสอดคล้องกับราคาตามโหนดโดยเมื่อมีการคำนวณราคาตามโหนดของแต่ละบัสในระบบแล้วเราจะสามารถคำนวณราคาตามเขตซึ่งใช้กับโหลดหรือผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป ตามกระบวนวิธีแบ่งกลุ่มบัสโดยการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักราคาตามโหนดของบัสต่างๆในกลุ่มบัสด้วยปริมาณโหลด ณ บัสต่างๆ ในกลุ่มบัส ทั้งนี้เพื่อให้จำนวนเงินการใช้ไฟฟ้าในกลุ่มบัสนั้นมีค่าเท่ากันทั้งในกรณีคิดราคาตามโหนดและคิดราคาตามเขตและมีการพิจารณากำลังการไหลเพื่อลดความคับคั่งในสายส่ง ตัวอย่างเช่น ในบางประเทศมีการแบ่งพิจารณาเป็นเขต เพื่อช่วยจัดการปัญหาความคับคั่งในสายส่ง พบว่าในกรณีที่เกิดมีความไม่เพียงพอของความจุสายจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแต่ละเขตโดยจะมีคิดราคาสำหรับโครงข่ายสายส่งนั้นๆ

แสดงการคำนวณราคาตามเขตดัง (2.4)

$$\alpha_{z,k} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} L_{i,k}\alpha_{i,k}}{\sum_{i=1}^{n_k} L_{i,k}} \qquad (2.4)$$

โดยที่

$\alpha_{z,k}$ คือ ราคาตามเขตของกลุ่มบัสที่ k

n_k คือ จำนวนบัสในกลุ่ม

$\alpha_{i,k}$ คือ ราคาตามโหนดของบัสต่างๆในกลุ่มบัส k

$L_{i,k}$ คือ ปริมาณโหลด

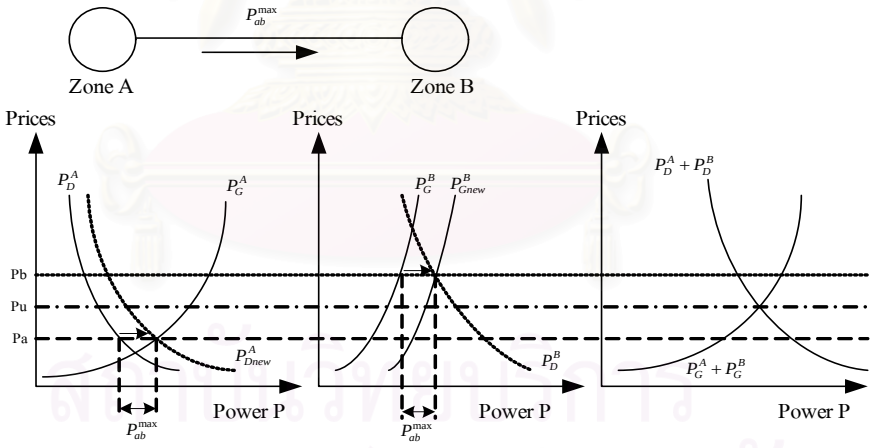
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณในช่วงเวลาล่วงหน้านั้นอาศัยน้ำหนักของโหลด (Load weight) ซึ่งกำหนดจากข้อมูลของรูปแบบของในอดีตซึ่งไม่รวมโหลดที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่สำหรับการคำนวณในช่วงเวลาจริงจะคำนวณโดยอาศัยน้ำหนักของโหลดซึ่งกำหนดจากข้อมูลของโหลดของ Power'pool state estimator ซึ่งไม่รวมโหลดที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

การคิดราคาตามเขตจะคิดราคาที่กลุ่มโหนดจะต้องมีการนิยามเรื่องของเขตก่อน ซึ่งการกำหนดเขตจะอาศัยแนวทางต่อไปนี้

- เมื่อราคาประจำโหนดมีความแตกต่างกันมาก เป็นระยะเวลามากกว่า 50 ชั่วโมงต่อปีโหนดเหล่านี้จะถูกกำหนดให้อยู่ในโหลดเขตที่แตกต่างกัน
- ขอบเขตของโหลดเขตควรกำหนดให้ง่ายต่อการวัดค่าการส่งผ่านไฟฟ้าระหว่างเขต
- ตลาดกลางจะกำหนดโหลดเขตใหม่เมื่อสถานการณ์เปลี่ยนแปลง

การคิดราคาตามเขตนี้สามารถนำไปสู่กระบวนการแยกตลาด (Market splitting procedure) โดยลักษณะของตลาดไม่จำเป็นต้องมีการจัดสรรกำลังการผลิตจากส่วนกลาง แต่มีการจัดการเพื่อปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตในกรณีที่เกิดความคับคั่งขึ้นสามารถอธิบายดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกระบวนการแยกของตลาด

สมมุติตัวอย่างมีระบบที่มีสองเขตมีสายส่งเชื่อมต่อเพื่อช่วยบรรเทาปัญหาความคับคั่งโดยมีความจุของสายส่งสูงสุดคือ $P_{ab}^{\max}$ เขต A มีต้นทุนการผลิตต่ำเนื่องจากเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ส่วนเขต B เป็นศูนย์กลางของโหลดหลักๆ ส่งผลทำให้โอกาสการส่งกำลังการผลิตเพิ่มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

โดยที่ผู้ผลิตและโหลดจะมีการนำเสนอข้อมูลในเขตคือ P_G^A, P_D^A, P_G^B, P_D^B ขั้นตอนแรกของการแยกกระบวนการตลาดกล่าวคือถ้าตลาดปกติไม่มีความคับคั่งเกิดขึ้นราคาที่เกิดในตลาดคือราคา p_u เพียงราคาเดียว ในกรณีที่สายส่งไม่มีข้อจำกัดจะสามารถเพิ่มกำลังการไหลได้ $P_{ab}^{\max}$ โดยผู้ปฏิบัติการของระบบก็จะทำการตัดสินใจในเรื่องการซื้อหรือขาย ตัวอย่างเช่นถ้าผู้ใช้สายส่งมีความจุถึง $P_{ab}^{\max}$ ดังนั้นต้องซื้อพลังงานราคาต่ำจากเขต A และขายพลังงานในราคาที่สูงในเขต B เพื่อให้เกิดความสนใจในการปรับเปลี่ยนความต้องการ จะพบว่าจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในเขต A และเขต B เมื่อมีความต้องการเกิดขึ้นในเขต A จะต้องมีการเพิ่มค่าทางด้านแกนนอนในรูปที่ 2.5 ดังสมการ

$$P_{Dnew}^A = P_D^A + P_{ab}^{\max} \tag{2.5}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการส่งพลังงานเกิดขึ้นในเขต B จะต้องมีการเพิ่มค่าทางด้านแกนนอนในรูปที่ 2.5 ดังสมการ

$$P_{Gnew}^B = P_G^B + P_{ab}^{\max} \tag{2.6}$$

ความจุของสายส่งระหว่างสองเขตมีค่าสูงสุดเมื่อมีการผูกขาดทางการค้าระหว่างเขต โดยราคาในเขต A จะเพิ่มขึ้นคือ P_a และราคาในเขต B จะลดลงคือ P_b ซึ่งมีความสอดคล้องในการเพิ่มของประสิทธิภาพที่ดีในตลาด สำหรับปฏิบัติการในการซื้อในพื้นราคาต่ำและขายในพื้นที่ราคาสูงซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการจัดการความคับคั่งที่เกิดขึ้น

วิธีการคิดราคาตามเขตก็คือการประยุกต์ใช้วิธีคิดราคาตามโหนด โดยไม่มีการเสนอที่แน่ชัดสำหรับความจุของสายส่ง โดยความจุที่ได้จะมาจากการจัดสรรที่มีการนำเสนอจากผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีการกำหนดตามเขตเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับผู้ปฏิบัติการในระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การจัดการความคับคั่งในตลาดต่างๆ

ในต่อไปนี้กล่าวถึงการจัดการความคับคั่งในตลาดไฟฟ้าที่สำคัญต่างๆ อันได้แก่ ตลาดของอังกฤษและเวลส์, ตลาดที่สำคัญในสหรัฐอเมริกา, ตลาดทางแถบนอร์เวย์ และตลาดในออสเตรเลีย ซึ่งล้วนแต่เป็นตลาดมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องมีข้อมูลที่หลากหลายที่เหมาะแก่การศึกษา การได้ศึกษาระบบที่มีอยู่ในที่ต่างๆ กันนอกจากจะทำให้เห็นตัวอย่างที่หลากหลายแล้วยังเป็นการเน้นย้ำถึงความสำคัญของปัญหาในการจัดการความคับคั่งอีกด้วย

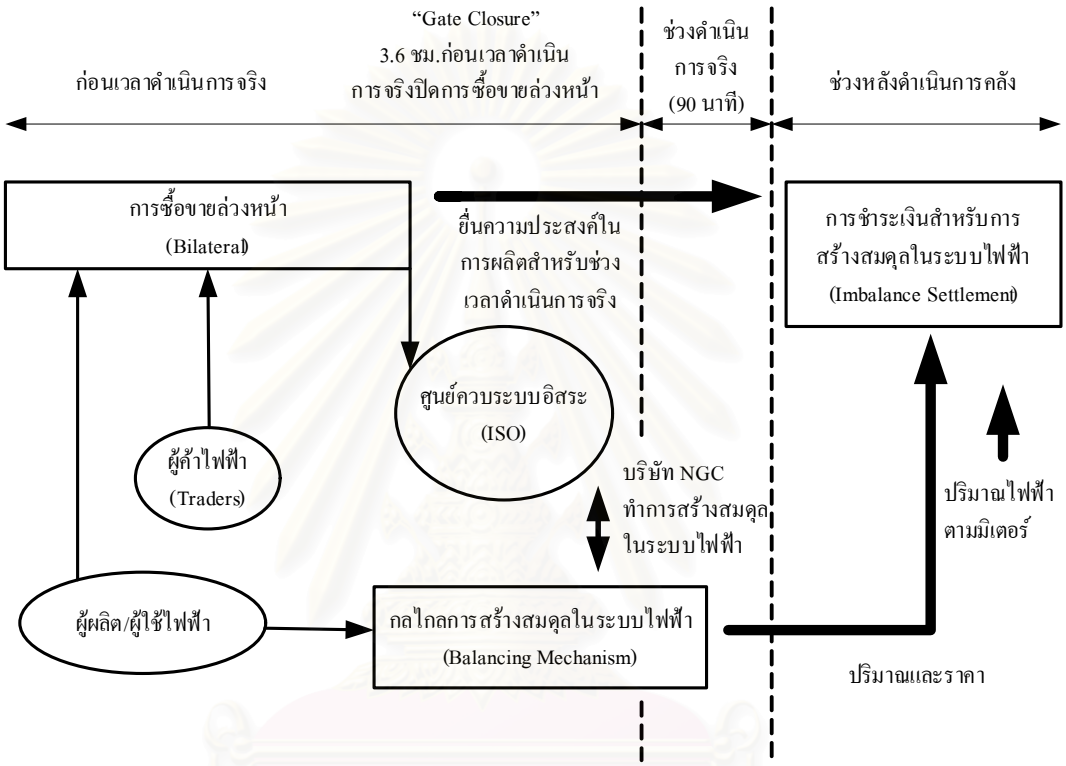
2.3.1 ตลาดไฟฟ้าในอังกฤษและเวลส์ [15, 16]

บริษัทเนชันแนลกริด (National Grid : NG) ผู้ปฏิบัติการศูนย์ควบคุมอิสระและระบบส่งไฟฟ้าจะมีหน้าที่ในการสร้างสมดุลในระบบไฟฟ้า (Balancing)โดยบริษัทเนชันแนลกริดสามารถสั่งให้ผู้ผลิตรายต่างๆ ที่ทำการประมูลราคาเข้ามาเพิ่มหรือลดการผลิตได้ ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการสร้างสมดุลในระบบไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปยังผู้ร่วมตลาดที่ไม่สามารถรักษาสัญญาที่ทำไว้ได้ ผู้ร่วมตลาดจะทำการพยากรณ์ความสามารถในการผลิตและความต้องการใช้ไฟฟ้าของตนเอง และสามารถทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าที่มีระยะเวลาต่างๆ กันได้ สัญญาเหล่านี้อาจมีการซื้อขายกันในตลาดล่วงหน้า เพื่อให้ผู้ร่วมตลาดมีโอกาสในการปรับปรุงปริมาณไฟฟ้าที่ทำสัญญาไว้เมื่อใกล้เวลาดำเนินการจริง การซื้อขายในลักษณะนี้เป็นแรงผลักดันให้ทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟทำสัญญากัน เนื่องจากค่าใช้จ่ายจากกลไกการสร้างสมดุล ณ เวลาดำเนินการจริงมีความไม่แน่นอนอยู่มาก ดังนั้นการทำสัญญาล่วงหน้าจึงเป็นวิธีการลดภาระความเสี่ยงของผู้ร่วมตลาดจากค่าใช้จ่ายดังกล่าว

ในประเทศอังกฤษและเวลส์บริษัทเนชันแนลกริดเป็นผู้บริหารจัดการและวางแผนการดำเนินงานระบบสายส่งทั้งหมด โดยดูแลและควบคุมการทำงานของระบบส่ง ซึ่งรวมถึงการวางแผนการขยายระบบส่ง ตลอดจนทำหน้าที่เป็นศูนย์ควบคุมระบบอิสระดูแลการดำเนินงานของระบบไฟฟ้ารวมทั้งกลไกการสร้างสมดุล ณ เวลาดำเนินการจริง

การกำหนดราคาการใช้สายส่งที่คับคั่งไม่ได้ถูกออกแบบขึ้นมาโดยเฉพาะ แต่บริษัทเนชันแนลกริดอาศัยการจ่ายค่าชดเชยให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่สามารถขายพลังงานไฟฟ้าได้เนื่องจากปัญหาความคับคั่งในสายส่ง โดยการจ่ายค่าชดเชยดังกล่าวขึ้นกับข้อจำกัดของแต่ละพื้นที่และต้นทุนที่เกิดขึ้น โดยต้นทุนในการบรรเทาความคับคั่งจะครอบคลุมค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการร้องขอเพื่อเพิ่มหรือลดการผลิต ซึ่งขาดลักษณะความเป็นธรรมชาติของการจัดสรรราคาของตลาดกลางและได้พบว่าระบบอาจมี

ต้นทุนในการบรรเทาความคับคั่งมากขึ้นเนื่องจากไม่มีความแตกต่างในการที่จะได้รับการช่วยเหลือจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในระยะหลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงของตลาดใหม่ในเดือนมกราคม 2001 ซึ่งสามารถแก้ปัญหาและจัดการความคับคั่งโดยการเปลี่ยนเป็นระบบ New Electricity Trading Arrangement (NETA)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างตลาดไฟฟ้าในประเทศอังกฤษและเวลส์

โดยการซื้อขายไฟฟ้าของประเทศอังกฤษและเวลส์นั้นปัจจุบันถือว่าไม่เป็น Power pool แต่ยังคงมีศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระเป็นบริษัทเนชันแนลกริดและเป็นเจ้าของระบบสายส่ง โดยประเทศสหราชอาณาจักรได้ปรับโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในครั้งแรกในปี ค.ศ.1990 ด้วยการนำระบบระบบตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้ามาใช้ซึ่งปรากฏว่าค่าไฟฟ้าในประเทศอังกฤษและเวลส์ลดลง 40% โดยเฉลี่ยภายในระยะเวลา 6 ปี ในขณะที่คุณภาพการให้บริการดีขึ้นเป็นลำดับ อย่างไรก็ตามระบบตลาดกลางประสบกับปัญหาบางประการทำให้ค่าไฟฟ้าไม่ลดลงเท่าที่ควรตามต้นทุนการผลิตที่ลดลง ประกอบกับรายละเอียดของกฎเกณฑ์ต่างๆถูกระบุไว้ในกฎหมายอย่างชัดเจนทำให้การปรับปรุงแก้ไขเป็นไปได้ยาก รัฐบาลอังกฤษจึงนำระบบ NETA มาใช้แทนระบบตลาดกลางเมื่อวันที่ 27 มีนาคม 2544

ระบบ NETA จะเป็นการซื้อขายภายใต้การทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย (Bilateral contract) โดยมีข้อผูกพันทางปริมาณอย่างชัดเจน ทั้งนี้ผู้ซื้อและผู้ผลิตไฟฟ้าจะพยากรณ์ปริมาณไฟฟ้าที่จะซื้อขายล่วงหน้าและทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้า เมื่อถึงเวลาดำเนินการจริงผู้ผลิตจะสั่งเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าเอง (Selt dispatch) ซึ่งหากมีปริมาณไฟฟ้าที่ขาดเกินบริษัท National Grid Company (NGC) ซึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ควบคุมระบบส่งไฟฟ้า (TransCo) จะทำหน้าที่รักษาความสมดุลในระบบ (Balancing) โดยให้ผู้ร่วมตลาดที่ประมูลราคาเข้ามาทำการเพิ่มหรือลดปริมาณไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความสมดุล ผู้ผลิตไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบน้อยกว่าปริมาณตามสัญญาจะต้องซื้อขายไฟฟ้าจากผู้ควบคุมระบบส่งไฟฟ้าเพื่อชดเชยไฟฟ้าส่วนที่ขาดในราคาซื้อจากระบบ (System Buy Price : SBP) และผู้ผลิตไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบมากกว่าปริมาณตามสัญญาจะต้องขายไฟฟ้าส่วนเกินให้แก่ผู้ควบคุมระบบส่งไฟฟ้าในราคาขายให้แก่ระบบ (System Sell Price : SSP) ทั้งนี้ราคา SBP จะสูงกว่าราคา SSP มาก เสมือนเป็นการทำโทษผู้ที่ไม่สามารถรักษาความสมดุลระหว่างการผลิตและการขายตามสัญญาของตน

2.3.2 ตลาดไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา [17, 18, 19]

เมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม 2539 องค์กรกำกับดูแลสาขาพลังงานในระดับรัฐบาลกลาง (Federal Energy Regulatory Commission : FERC) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ออกว่าด้วย "การส่งเสริมให้มีการแข่งขันในกิจการไฟฟ้าและการชดเชยต้นทุนติดค้างในกิจการผลิตไฟฟ้าและระบบสายส่งไฟฟ้า" เพื่อเป็นการกำหนดกรอบกว้างๆ ในการสนับสนุนให้รัฐต่างๆ พิจารณานโยบายการเปิดเสรีในกิจการไฟฟ้า ทั้งนี้แต่ละรัฐมีความเป็นอิสระในการกำหนดตารางเวลาและรูปแบบการปรับโครงสร้างของตนเพื่อนำไปสู่การแข่งขันอย่างเสรี

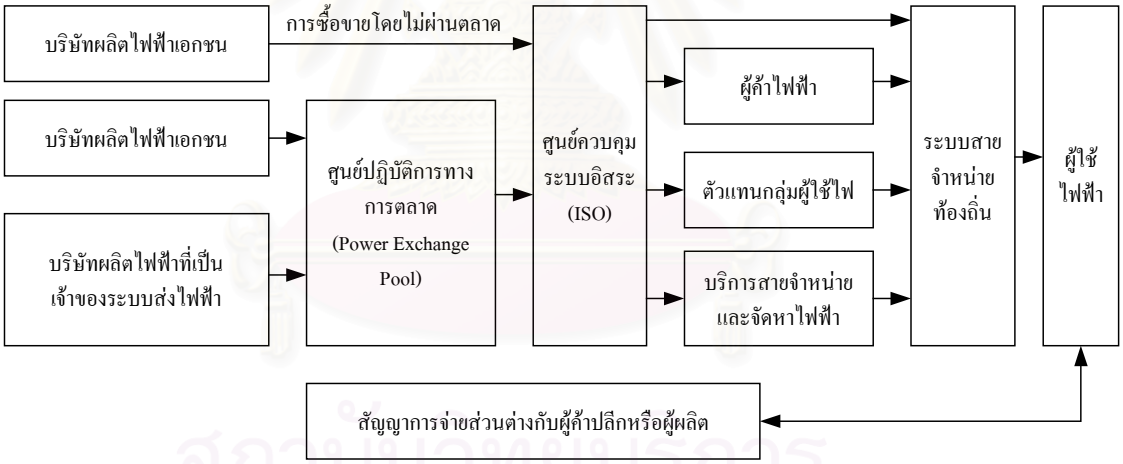
วัตถุประสงค์หลักในการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้ามีดังนี้

1. เปลี่ยนจากระบบผูกขาดเป็นระบบที่มีการแข่งขันตามกลไกตลาด
2. แยกกิจการการผลิตไฟฟ้าออกจากกิจการระบบสายส่งไฟฟ้า
3. ลดการกำกับดูแลจากภาครัฐ
4. เพื่อหาแนวทางการจัดการกับต้นทุนติดค้าง (ส่วนหนึ่งมาจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์)
5. สนับสนุนให้มีการแข่งขันทั้งในระดับขายส่งและขายปลีก
6. เพื่อปรับปรุงคุณภาพบริการและเพิ่มทางเลือกให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า
7. เพื่อส่งเสริมให้มีการลงทุนเพิ่มขึ้นในกิจการการผลิต, ระบบสายส่ง และสายจำหน่ายไฟฟ้า

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในสหรัฐอเมริกาในช่วงเริ่มดำเนินการมี 4 แห่ง คือ ตลาดในรัฐแคลิฟอร์เนีย, ตลาด PJM, ตลาดนิวอิงแลนด์ และตลาดในรัฐนิวยอร์คดังแสดงตัวอย่างต่อไปนี้

2.3.2.1 ตลาดไฟฟ้าแคลิฟอร์เนีย

ในแคลิฟอร์เนียนั้นศูนย์ควบคุมอิสระถูกจัดตั้งขึ้นเพื่อทำหน้าที่ดูแลความมั่นคงของระบบไฟฟ้าและการดำเนินการทางการตลาด 2 ประเภทคือ ตลาดพลังงานไฟฟ้า ณ เวลาดำเนินการจริงและตลาดสำหรับบริการเสริมความมั่นคงของระบบ ได้แก่ การให้บริการไฟฟ้าสำรองประเภทต่างๆ, บริการด้านกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟและความสามารถในการขนานเครื่องกรณีที่ไฟฟ้าดับทั้งระบบ (Black-start capabilities) เป็นต้น ส่วนการดำเนินการทางการตลาดอื่น ๆ ได้แก่ ตลาดล่วงหน้าทุกๆ ชั่วโมง (Hourly ahead market), ตลาดล่วงหน้า 1 วัน (Day ahead market), ตลาดล่วงหน้า (Block-forward market) และตลาดสำหรับพลังงานสีเขียวหรือพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green market) จะอยู่ในความดูแลของศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด (Power Exchange : PX)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าของรัฐแคลิฟอร์เนีย

การบริหารสายส่งของรัฐนี้จะบริหารใน 2 ลักษณะได้แก่ เรื่องของความมั่นคงของระบบไฟฟ้าและความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยเมื่อมีความคับคั่งในสายส่งต้องมีการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดเพื่อลดปัญหาความคับคั่ง โดยมีการแยกศูนย์ควบคุมระบบเป็นอิสระออกจากตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (PX) ในรัฐแคลิฟอร์เนีย เพื่อให้การดำเนินการทางการตลาดของ PX แยกจากการดำเนินการทางด้านเทคนิคของศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระและเพื่อไม่ให้ศูนย์ควบคุมอิสระมี

อำนาจในการเข้าแทรกแซงกลไกตลาดหากไม่มีความจำเป็น ดังนั้นในช่วงที่ระบบส่งไฟฟ้าประสบปัญหาความคับคั่งในสายส่งไฟฟ้าซึ่งเกิดจากผลของการซื้อขายไฟฟ้าที่ไม่สมดุลในตลาดล่วงหน้าศูนย์ควบคุมอิสระจะแจ้งให้ผู้ร่วมตลาดทราบ เพื่อเปิดโอกาสให้ผู้ซื้อและผู้ขายปรับเปลี่ยนข้อเสนอการซื้อหรือขายการไฟฟ้า (Adjustment bids) ได้ตามความพร้อมของระบบ

การแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่งของแคลิฟอร์เนียอาศัยการจัดการทั้งระหว่างเขตและภายในเขตที่ได้แบ่งไว้แล้ว (Inter-zonal and Intra-zonal congestion management) สำหรับการจัดการระหว่างเขตนั้นจะมีการคำนวณค่าใช้สายส่งระหว่างเขตโดยศูนย์ควบคุมอิสระซึ่งอาศัยค่าหน่วยสุดท้ายของกำลังวัตต์ในทุกๆ ชั่วโมงและนำใช้เรียกเก็บเมื่อเกิดความคับคั่งในสายส่ง การจัดการความคับคั่งระหว่างเขตนี้มีทั้งแบบในตลาด 1 วันล่วงหน้าและ 1 ชั่วโมงล่วงหน้า ในตลาดแบบ 1 วันล่วงหน้านั้นศูนย์ควบคุมอิสระจะเริ่มต้นขั้นตอนจากการประเมินจากการไหลของกำลังไฟฟ้าว่าการส่งกำลังไฟฟ้าที่จัดสรรจะก่อให้เกิดความคับคั่งในสายส่งหรือไม่ ถ้ามีแนวโน้มว่าจะเกิดความคับคั่งศูนย์ควบคุมอิสระจะใช้ข้อเสนอซื้อหรือขายการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าในการจัดการกับความคับคั่ง กระบวนวิธีในการจัดการจะเป็นการวิเคราะห์ให้ค่าใช้จ่ายในการจัดสรรกำลังผลิตมีค่าต่ำสุดบนพื้นฐานของข้อเสนอซื้อหรือขายการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าดังกล่าว นั่นคือโดยพื้นฐานแล้วเป็นการวิเคราะห์ผลคูณระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้า (Power injection) และราคาเสนอปรับกำลังไฟฟ้า (Adjustment bid price) นั่นเองในตลาดแบบ 1 ชั่วโมงล่วงหน้านั้นศูนย์ควบคุมอิสระจะทำการจัดสรรการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตอีกครั้งเพื่อลดความคับคั่งในสายส่ง แต่คราวนี้ศูนย์ควบคุมอิสระจะไม่อนุญาตให้ผู้ใดทำการปรับเปลี่ยนข้อเสนอได้อีกและหาก ณ เวลาจริงเกิดความคับคั่งขึ้นจริงศูนย์ควบคุมอิสระก็จะทำการจัดสรรการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าอย่างพอเหมาะเท่าที่จำเป็น

ส่วนการจัดการภายในเขตนั้นศูนย์ควบคุมอิสระจะทำการจัดสรรกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่โดยศูนย์ควบคุมอิสระจะพยายามจัดการให้ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการจัดสรรดังกล่าวมีค่าต่ำสุดบนพื้นฐานของข้อเสนอซื้อหรือขายการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2.2 ตลาดไฟฟ้า PJM

ตลาดไฟฟ้า PJM เป็นตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่ควบคุมการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าจากศูนย์กลาง (Centrally-dispatched electric control area) ที่ครอบคลุมพื้นที่มลรัฐเพนซิลเวเนีย, นิวเจอร์ซีย์, แมรีแลนด์, เดลาแวร์, เวอร์จิเนีย และดิสตริกต์ออฟโคลัมเบีย ซึ่งได้มีการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่มีศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า

ตลาดไฟฟ้า PJM เริ่มก่อตั้งในปี 2470 และนับเป็นตลาดเพื่อความร่วมมือในการจัดหาไฟฟ้าด้วยระบบตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าเป็นแห่งแรกของประเทศสหรัฐอเมริกาและของโลก อย่างไรก็ตามในช่วงแรกเป็นเพียงการร่วมมือกันระหว่างการไฟฟ้าต่างๆในเขต PJM (ซึ่งอาจมีเอกชนหรือเทศบาลเป็นเจ้าของ) เพื่อจัดหากำลังผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบโดยรวมมีความมั่นคง ดังนั้นอาจจะมีการซื้อขายไฟฟ้าบ้างระหว่างการไฟฟ้าต่างๆ ในตลาดไฟฟ้า PJM แต่การไฟฟ้านั้นๆ ยังคงเป็นผู้ผูกขาดการจัดหาไฟฟ้าให้ผู้ใช้ไฟในเขตพื้นที่ของตน เนื่องจากการไฟฟ้าดังกล่าวเป็นเจ้าของและควบคุมดูแลทั้งกิจการการผลิต, ระบบสายส่ง และสายจำหน่ายไฟฟ้า

ต่อมาในปี 2540 PJM ได้เปลี่ยนสถานภาพเป็น Limited Liability Company (L.L.C.) ซึ่งเปิดโอกาสให้บริษัทผลิตไฟฟ้าเอกชนอื่นๆ สามารถเข้าร่วมเป็นสมาชิกและประมูลเสนอขายไฟฟ้าในตลาด (Bid-based energy market) โดยต้องจ่ายค่าบริการสายส่ง (Open access transmission tariff) หลังจากนั้นจึงได้มีการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่มีศูนย์ควบคุมอิสระ และเปิดให้ผู้ใช้ไฟไฟฟ้ามีทางเลือกในการซื้อไฟฟ้าเป็นแห่งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาตามเจตนารมณ์ของ FERC

โครงสร้างของตลาด PJM ประกอบด้วยการไฟฟ้าหลัก 8 การไฟฟ้า โดยการไฟฟ้าเหล่านี้เป็นเจ้าของทั้งกิจการระบบผลิต, ระบบสายส่ง และระบบสายจำหน่าย แต่หลังจากที่มีการจัดตั้งตลาดกลางและศูนย์ควบคุมอิสระแล้วการไฟฟ้าทั้ง 8 ก็ได้ดำเนินการลดการถือหุ้นหรือขายกิจการผลิตไฟฟ้าของตนออกไปเพื่อแยกเป็นอิสระจากกิจการระบบสายส่ง ทั้งนี้การดำเนินการลดสัดส่วนการถือหุ้นและขายโรงไฟฟ้าดังกล่าวยังไม่แล้วเสร็จสมบูรณ์ การไฟฟ้าบางแห่งยังคงมีหุ้นหรือเป็นเจ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้าบางหน่วยอยู่ นอกจากการไฟฟ้าหลักทั้ง 8 แล้วยังมีผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระอื่นๆ และการไฟฟ้าของเทศบาลท้องถิ่น (Municipalities) ต่าง ๆ ร่วมอยู่ในระบบด้วย

บทบาทหน้าที่ของตลาดไฟฟ้า PJM แตกต่างจากตลาดกลางในรัฐแคลิฟอร์เนีย โดยในตลาดไฟฟ้า PJM ได้รวมหน้าที่ของศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (ISO) ศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด (MO) และศูนย์บริหารการชำระเงิน (SA) เข้าไว้ด้วยกัน ในขณะที่ตลาดกลางในรัฐแคลิฟอร์เนียได้แยกหน้าที่ระหว่างศูนย์ควบคุมอิสระและ MO ดังนั้น ศูนย์ควบคุมอิสระในตลาดไฟฟ้า PJM จึงรวมผู้ปฏิบัติการทางการ

ตลาดไว้ด้วยในช่วงแรกตลาดไฟฟ้า PJM มีเพียง 2 ตลาด กล่าวคือ ตลาดล่วงหน้า 1 วัน (Day-ahead market) และตลาด ณ เวลาดำเนินการจริง (Real-time market) ต่อมามีการจัดตั้งตลาดล่วงหน้าทุก ๆ ชั่วโมง (Hourly market) เพิ่มขึ้นเพื่อให้การดำเนินการตลาดมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยตลาดไฟฟ้า PJM เป็นตลาดแบบสมัครใจ (Voluntary market) กล่าวคือ ผู้ซื้อขายไฟฟ้าสามารถดำเนินการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกลางได้ เจ้าหน้าที่ของ PJM สามารถติดตามปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าแลกเปลี่ยนไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งไฟฟ้าได้จากแผงจอคอมพิวเตอร์ในห้องควบคุม

ในกรณีที่จัดการกับความคับคั่งของสายส่งไฟฟ้านั้นตลาด PJM จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณเพื่อจัดสรรปริมาณการผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าแต่ละราย และมีการกำหนดราคาแตกต่างกันตามพื้นที่ โดยราคาจะแตกต่างกันตามจุดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าซึ่งเป็นการคิดราคาตามโหนดนั่นเอง

2.3.2.3 ตลาดไฟฟ้านิวอิงแลนด์ (New England)

นิวอิงแลนด์ประกอบด้วยรัฐทางด้านตะวันออกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกา 6 มลรัฐ คือ เวอร์มอนต์, นิวแฮมป์เชียร์, แมสซาชูเซตส์, คอนเนตทิคัต และโรดไอแลนด์ ซึ่งในนิวอิงแลนด์ได้มีการจัดตั้งตลาดเพื่อความร่วมมือในการจัดหาไฟฟ้านิวอิงแลนด์ หรือนิวอิงแลนด์พูล (New England Power Pool: NEPOOL) ตั้งแต่ปี 2514 ภายหลังจากรัฐทางด้านตะวันออกของสหรัฐอเมริการวมถึงรัฐในเขตนิวอิงแลนด์ประสบปัญหาไฟดับครั้งใหญ่ นิวอิงแลนด์พูลที่จัดตั้งขึ้นมาเป็นการร่วมมืออย่างสมัครใจของผู้ผลิตไฟฟ้าที่เป็นสมาชิก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อร่วมมือกันในการจัดหาไฟฟ้าและควบคุมระบบเพื่อให้มีความมั่นคง

ในปี 2540 ได้มีการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่เรียกว่า ศูนย์ควบคุมอิสระนิวอิงแลนด์ (ISO New England) ขึ้นในรูปขององค์กรที่ไม่แสวงหากำไร ภายหลังจากที่ FERC ได้ให้ความเห็นชอบการจัดตั้งตลาดกลางดังกล่าว ได้มีการถ่ายโอนอำนาจหน้าที่ในการจัดหาไฟฟ้าในระดับขายส่ง และการควบคุมระบบสายส่งไฟฟ้าในเขตพื้นที่นิวอิงแลนด์รวมถึงการโอนอุปกรณ์ระบบควบคุมและพนักงานจากนิวอิงแลนด์พูลมายังศูนย์ควบคุมอิสระของนิวอิงแลนด์ นอกจากนี้ศูนย์ควบคุมอิสระของนิวอิงแลนด์ยังมีหน้าที่ในการดำเนินการเพื่อให้มีการแข่งขันอย่างเสรีตามคำสั่งของ FERC

การดำเนินการตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในนิวอิงแลนด์เริ่มขึ้นเมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม 2542 โดยศูนย์ควบคุมอิสระทำหน้าที่เป็นทั้งผู้ควบคุมระบบและผู้ปฏิบัติการทางการตลาด (Market operator) แต่

แยกเป็นอิสระจากบริษัทระบบสายส่งและบริษัทผลิตไฟฟ้า ดังนั้นโครงสร้างตลาดกลางของนิวอิงแลนด์จึงมีลักษณะคล้ายคลึงกับตลาดไฟฟ้า PJM

การกำกับดูแลศูนย์ควบคุมอิสระนั้นประกอบด้วยคณะกรรมการบริหาร (Board of directors) ซึ่งประกอบด้วยบุคคลอิสระที่ไม่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับกิจการไฟฟ้า ซึ่งมีหน้าที่ในการแต่งตั้งประธานเจ้าหน้าที่บริหาร (CEO) และดูแลการทำงานของศูนย์ควบคุมอิสระ ภายใต้โครงสร้างดังกล่าวศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้ามีอิสระในการบริหารและดำเนินงานในระดับหนึ่ง แต่อำนาจของศูนย์ควบคุมอิสระ มีการถ่วงดุลโดยนิวอิงแลนด์พูล (NEPOOL) (หลังจากที่มีการย้ายระบบควบคุมและอำนาจในการควบคุมระบบมาไว้ที่ศูนย์ควบคุมอิสระแล้ว) ซึ่งประกอบด้วย สมาชิกนิวอิงแลนด์พูล (NEPOOL) เดิม หรือคณะกรรมการผู้ร่วมตลาด (Participants committee) ซึ่งมีอำนาจในการพิจารณาอนุมัติงบดำเนินการของศูนย์ควบคุมอิสระและให้ความเห็นชอบกฎเกณฑ์ทางการตลาด (Market rules)

เมื่อเทียบกับตลาดไฟฟ้าอื่นๆ ในสหรัฐอเมริกาตลาดไฟฟ้าของนิวอิงแลนด์มีลักษณะเฉพาะคือมีผู้ผลิตไฟฟ้าจำนวนมาก (เป็นจำนวนถึง 190 ราย) และลักษณะความเป็นเจ้าของยังมีความหลากหลาย กล่าวคือมีทั้งที่เป็นของเทศบาลท้องถิ่น (Public-owned municipal utilities) และของบริษัทเอกชนคละกันไป นอกจากนี้ผู้ผลิตไฟฟ้าบางราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งการไฟฟ้าเทศบาล) ยังเป็นเจ้าของระบบสายส่งและสายจำหน่ายไฟฟ้าอีกด้วย อย่างไรก็ตามได้เริ่มมีการดำเนินการแปรรูปกิจการไฟฟ้าเพื่อให้แยกกิจการผลิตออกเป็นอิสระจากกิจการสายส่งไฟฟ้า

ลักษณะตลาดไฟฟ้าของศูนย์ควบคุมอิสระของนิวอิงแลนด์ประกอบด้วยตลาดไฟฟ้า 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ตลาดพลังงานไฟฟ้าและตลาดเสริมความมั่นคงระบบ โดยตลาดพลังงานไฟฟ้าจะมีทั้งตลาด ณ เวลาดำเนินการจริง (Real time energy market) และตลาดล่วงหน้า (Forward market) ในส่วนของการแข่งขันในระดับค้าปลีก เนื่องจากผู้ผลิตไฟฟ้าหลายรายประสบปัญหาการลงทุนที่ไม่มีประสิทธิภาพในอดีต (เช่นการลงทุนสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์) ทำให้เกิดปัญหาหนี้สินติดค้าง (Stranded cost) ผู้ผลิตไฟฟ้าและการไฟฟ้าเทศบาลบางรายจึงเกรงว่าหากเปิดให้มีการแข่งขันในระดับค้าปลีกอย่างเต็มที่อาจทำให้ไม่สามารถเรียกต้นทุนคืนได้

กลไกในการเรียกเก็บค่าชดเชยหนี้สินติดค้างในนิวอิงแลนด์จะใช้วิธีคล้ายกับรัฐแคลิฟอร์เนีย กล่าวคือ มีการเรียกเก็บค่าการเปลี่ยนเข้าสู่ระบบการแข่งขันจากผู้ใช้ไฟ (Access charge) แต่การเรียกเก็บในกรณีของนิวอิงแลนด์ บริษัทระบบสายจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้าเป็นผู้เรียกเก็บจากผู้ใช้ไฟในเขตพื้นที่ของตนซึ่งมีผลทำให้ในช่วงเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ระบบแข่งขัน (Transition) ผู้ใช้ไฟฟ้ายังไม่สามารถ

เลือกซื้อไฟฟ้าได้อย่างอิสระหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งยังไม่มีการแข่งขันในระดับขายปลีกไฟฟ้า (Retail competition) อย่างแท้จริงจนกว่าการเรียกเก็บค่าการเปลี่ยนเข้าสู่ระบบการแข่งขันจะหมดไป (ในกรณีของรัฐแมสซาชูเสทส์จะใช้เวลาถึง 7 ปี) ดังนั้นผู้ใช้ไฟทั้งรายเล็กและรายใหญ่ ในขณะนี้ยังไม่สามารถซื้อไฟฟ้าจากตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าโดยตรงได้ การซื้อขายไฟฟ้าในตลาดไฟฟ้าจะต้องผ่านผู้ค้าส่ง (Wholesalers) เท่านั้น

ในระหว่างที่มีการเก็บค่าการเปลี่ยนเข้าสู่ระบบการแข่งขันหากผู้ใช้ไฟมีความประสงค์ที่จะเปลี่ยนผู้จัดหาไฟฟ้า (Supplier) ก็สามารถดำเนินการได้ โดยจะต้องจ่ายค่าไฟฟ้าในราคาตลาดซึ่งสูงกว่าราคา “มาตรฐาน” (Standard offer) หรือราคาที่ผู้ใช้ไฟสามารถซื้อได้ในกรณีที่ไม่เปลี่ยนผู้จัดหาไฟฟ้าราคา “มาตรฐาน” ดังกล่าวจะต่ำกว่าราคาตลาดไฟฟ้าทั่วไป เนื่องจากมีการพิจารณาให้ส่วนลดร้อยละ10 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปกป้องผู้ใช้ไฟรายย่อยไม่ให้จ่ายค่าไฟฟ้าในราคาที่สูงขึ้นหลังจากที่มีการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้า

ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงปัญหาหลายๆ ประการของระบบในตลาดไฟฟ้าของนิวอิงแลนด์ ประการแรก จำนวนโรงไฟฟ้ามีไม่มากพอที่จะสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว กล่าวคือ โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นโรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังไฟฟ้าตามความต้องการพื้นฐาน (Base load plant) ในขณะที่โรงไฟฟ้าที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peaking plant) เช่น โรงไฟฟ้ากังหันแก๊สมีจำนวนน้อย ประการที่สองกฎเกณฑ์ทางการตลาด (Market rules) ยังไม่สามารถป้องกันหรือแก้ไขการดำเนินการของผู้ผลิตไฟฟ้าที่อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบโดยรวม เช่นการตรวจสอบและลงโทษต่อผู้ผลิตที่หยุดเดินเครื่องผลิตเพื่อซ่อมบำรุงรักษาโดยไม่แจ้งล่วงหน้า (Unplanned maintenance) เพื่อใช้เป็นช่องทางแสวงหารายได้เกินควร ประการสุดท้าย คือ ปัญหาที่เกิดขึ้นสะท้อนให้เห็นถึงความไม่คล่องตัวในการดำเนินงานของ ศูนย์ควบคุมอิสระในการแก้ปัญหา เนื่องจากการแก้กฎเกณฑ์ต่างๆ ของตลาดไฟฟ้าจำเป็นต้องได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการผู้ร่วมตลาดหรือนิวอิงแลนด์พูล (NEPOOL) ด้วยคะแนนเสียงที่มากกว่า 2 ใน 3 หรือร้อยละ 66 แต่คณะกรรมการดังกล่าวประกอบด้วยกลุ่มผู้ผลิตไฟฟ้า (การไฟฟ้าเทศบาลและบริษัทเอกชน) ซึ่งมีความเห็นขัดแย้งกับศูนย์ควบคุมอิสระและควบคุมสิทธิในการออกเสียงมากถึงร้อยละ 40 ทำให้การแก้ไขกฎเกณฑ์ทางการตลาดเป็นไปด้วยความยากลำบาก

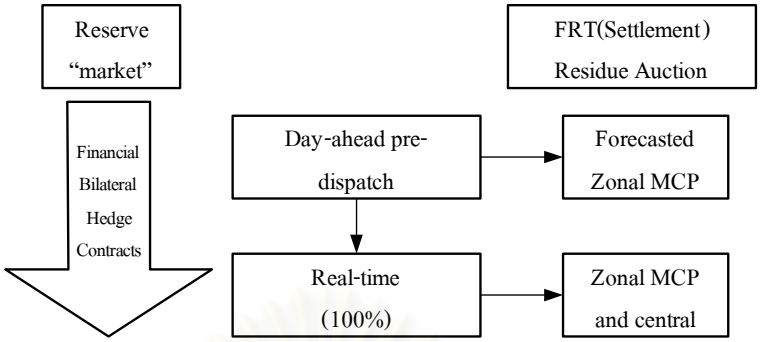
จากประสบการณ์การจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาจะเป็นบทเรียนสำหรับประเทศไทยซึ่งอยู่ในระหว่างการเตรียมการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า กล่าวคือควรมีการเตรียมการเพื่อให้กฎเกณฑ์ทางการตลาด (Market Rules) มีความพร้อมรัดกุมและเป็นธรรมก่อนที่จะเริ่ม

ให้มีการแข่งขันหากต้องมีการเปลี่ยนแปลงกฎดังกล่าว ขบวนการในการอนุมัติการเปลี่ยนแปลงกฎจะต้องมีความเหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการขัดแย้งและไม่สามารถหาข้อยุติได้ดังเช่นในกรณีของตลาดไฟฟ้านิวอิงแลนด์

2.3.3 ตลาดไฟฟ้าในประเทศออสเตรเลีย [9]

ตลาดไฟฟ้าของออสเตรเลียมีการจัดตั้งขึ้นในปี 2542 มีชื่อว่า National Electricity Market Company Limited (NEMMCO) โดยที่ NEMMCO จะมีตลาดไฟฟ้าสำหรับการปฏิบัติการและการจัดการพลังงานที่สอดคล้องกับ National Electricity Code : NEC โดยรูปแบบของ NEMMCO จะมีการปฏิบัติการในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า ณ เวลาหนึ่งๆ ซึ่งใน NEMMCO จะมีการปฏิบัติการด้วยศูนย์กลางเพื่อวางแผนจัดสรรการผลิต, การใช้โหลด, การบริการสายส่ง และการบริการเสริมความมั่นคงของตลาดไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความสมดุลตามความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและจะพบว่าในตลาดไฟฟ้าของออสเตรเลียมีหลักการของตลาดคล้ายกับตลาดของสหรัฐอเมริกาและนิวซีแลนด์ โดยใน NEMMCO มีการปฏิบัติการของตลาดทุก 5 นาที สำหรับทุกรอบการจัดสรรจะมีการพิจารณาในเรื่องของข้อจำกัดสำหรับกำหนดการผลิต, การบริการโครงข่ายสายส่ง, โหลด, การบริการผลิต และการบริการโหลดเพื่อเสริมความมั่นคงของระบบ นอกจากนั้นใน NEMMCO มีการพิจารณาเรื่องข้อจำกัดของโครงข่ายสายส่งภายในพื้นที่และข้อจำกัดของโครงข่ายสายส่งนอกพื้นที่ ซึ่งจะใช้วิธีการประยุกต์การคิดราคาตามโหนดเพื่อทำการจัดสรรกำลังการผลิตและการใช้โหลด แต่อย่างไรก็ตามในตลาดไฟฟ้าออสเตรเลียมีลักษณะของตลาดเป็นแบบเขตการนำเสนอของตลาดในช่วงเวลาหนึ่งๆ ภายใต้ NEMMCO จะมีการปรับปรุงและดูแลโดย NECA ตัวอย่างของราคาที่แตกต่างสำหรับทุกโหนดในระบบในพื้นที่ที่นิยามด้วยโหนดฐาน โดย NEMMCO จะมีการจัดการในเรื่องของความแตกต่างของราคาที่เรียกว่า Inter regional settlement residue และการกระจายการลงทุนของสมาชิกในตลาด โดยที่ขอบเขตของตลาดในกระบวนการประมูลต้องอยู่ภายใต้ Mechanism ที่เป็นดัชนีสำหรับราคาที่แตกต่างของค่าระหว่างพื้นที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 โครงสร้างตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าของออสเตรเลีย

ถึงแม้ว่าตลาดของออสเตรเลียและสแกนดิเนเวียจะมีการคิดด้วยกระบวนราคาตามเขตระบบแต่ในออสเตรเลียก็มีกระบวนการคิดแตกต่างกับตลาดของสแกนดิเนเวีย โดยในออสเตรเลียจะมีการจัดสรรจากศูนย์กลางภายใต้พื้นที่ของโหนดพื้นฐานที่มีการกำหนดขึ้น 5 เขตในระบบโครงข่าย แต่ในทางตรงข้ามในสแกนดิเนเวียมีการจัดสรรด้วยหลักการของตลาดแบบกระจายซึ่งในออสเตรเลียและระบบของนอร์ดิคจะพบความแตกต่างของปัญหาราคาในเขต 2 อย่างคือ ในออสเตรเลียจะมีการจัดการปัญหาด้วยการประยุกต์ใช้จากศูนย์กลางที่ได้มีการออกแบบไว้และมีการรวมตัวกันของสายส่งต่างๆ ในโหนดพื้นฐานพิจารณาง่าย ๆ คือผลประโยชน์ที่ได้รับคือความโปร่งใส่ของการค้า ส่วนในสแกนดิเนเวียจะอาศัยตลาดแบบกระจายภายใต้อิสระของสมาชิกในตลาด

2.3.4 ตลาดไฟฟ้าในกลุ่มนอร์เวย์ [20]

กลุ่มประเทศนอร์ดิคหรือกลุ่มประเทศในนอร์ดพูลนั้นได้แก่ ประเทศนอร์เวย์ สวีเดน เดนมาร์คและฟินแลนด์ แต่โดยปกติแล้วสแกนดิเนเวียนั้นรวมถึงไอซ์แลนด์เข้าไปด้วย การก่อตัวของนอร์ดพูลนั้นเริ่มต้นในประเทศนอร์เวย์และสวีเดนก่อนส่วนเดนมาร์คและฟินแลนด์ได้เข้าร่วมในเวลาต่อมาตลาดขายส่งล่วงหน้า 1 วัน (Day-ahead wholesale electricity market) ในกลุ่มนอร์เวย์เรียกว่านอร์ดพูลซึ่งเป็นตลาดแบบสมัครใจซึ่งการซื้อหรือขายพลังงานไฟฟ้านอกตลาดสามารถกระทำได้นอร์ดพูลนั้นมีผู้จัดการสายส่งสวีเดนและนอร์เวย์ (Swedish and Norwegian transmission operator) เป็นเจ้าของ

การจัดการความคับคั่งในสายส่งในกลุ่มนอร์ดิคอาศัยวิธีการ 2 แบบ ได้แก่ การแยกตลาด (Market-splitting) ซึ่งเป็นแบบที่อาศัยการคิดราคาการใช้สายส่งแบบแบ่งเขต โดยการแยกตลาดนี้จะมีความสัมพันธ์กับการดำเนินการในตลาดขายส่งล่วงหน้า 1 วัน และแบบที่มีการซื้อหรือขายพลังงานเพื่อ

จัดการกับความคับคั่งแบบซื้อกลับคืน (Counter-trading) ซึ่งอาศัยตลาดซื้อขายการปรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า

ในการจัดการความคับคั่งนั้นจะมีการพิจารณาปรับเปลี่ยนการใช้ราคาพลังงานไฟฟ้าในระบบ (System price) มาเป็นราคาแบบแยกตลาดและแบบซื้อกลับคืน โดยแบบแยกตลาดจะเป็นตัวเร่งผลให้ราคาสูงขึ้นในพื้นที่ที่กำลังผลิตมีปริมาณน้อย แต่จะทำให้ราคาต่ำลงในพื้นที่ที่กำลังผลิตมีปริมาณมาก ส่วนการจัดการแบบซื้อกลับคืนนั้นต่างจากแบบแยกตลาดอย่างชัดเจน โดยแบบซื้อกลับคืนจะไม่คำนึงถึงสมดุลระหว่างปริมาณการผลิตและราคาแต่จะอาศัยตลาดที่แยกตัวออกมาให้ผู้ผลิตไฟฟ้าได้เสนอขายการปรับเปลี่ยนปริมาณพลังงานไฟฟ้า ซึ่งกลไกแบบนี้จะอาศัยการซื้อกลับโดยให้ผู้ผลิตในตำแหน่งที่ตั้งที่ดีกว่ามาผลิตไฟฟ้าแทนผู้ผลิตที่อยู่ในทำเลที่ด้อยกว่าผู้ซื้อดังกล่าวมีเพียงรายเดียวก็คือผู้จัดการระบบสายส่งซึ่งสามารถแบกรับค่าใช้จ่ายในการเพิ่มหรือลดกำลังผลิตของผู้ผลิตไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายนี้ซึ่งอาจเป็นเพียงบางส่วนจะไปเรียกเก็บจากผู้ใช้ระบบสายส่งโดยรวมผ่านค่าธรรมเนียมการใช้สายส่ง ทั้งนี้รายละเอียดในการจัดเก็บขึ้นอยู่กับข้อกำหนดที่ออกแบบโดยองค์กรดูแลและกำกับระบบ

การจัดการในนอร์เวย์จะเน้นที่ตลาดแบบแยกแต่ในสวีเดนจะเน้นตลาดแบบแบบซื้อกลับคืน ในนอร์เวย์นั้นเมื่อความคับคั่งได้รับการวิเคราะห์ว่าจะเกิดขึ้นระบบจะถูกแบ่งเป็นพื้นที่การเสนอซื้อหรือขาย การแบ่งนี้จะถูกประกาศโดยศูนย์ควบคุมอิสระก่อนการเสนอซื้อหรือขายกำลังไฟฟ้าทั่วไปในตลาด ณ เวลาจริง ในแต่ละสัปดาห์จะมีการเผยแพร่การพยากรณ์พื้นที่การเสนอซื้อหรือขาย โดยทั่วไปจะมี 2 ถึง 5 เขต ถ้าผู้เสนอการซื้อหรือขายอยู่ในพื้นที่คร่อมเขตกันก็ต้องแยกการเสนอซื้อหรือขายตามเขตสภาวะตลาด ณ เวลาจริงจะได้รับการจัดสรร ถ้าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่การเสนอซื้อหรือขายไม่ก่อให้เกิดความคับคั่งระบบก็จะใช้ราคาตลาดสำหรับระบบปกติ ซึ่งจะเหมือนกับผลที่ได้จากกรณีที่ไม่มีการประกาศพื้นที่การเสนอซื้อหรือขาย แต่ถ้าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ดังกล่าวก่อให้เกิดความคับคั่งแต่ละพื้นที่ก็จะแยกกันใช้การเสนอซื้อหรือขายของพื้นที่ของตนเองเท่านั้น พื้นที่ที่มีกำลังผลิตเกินจะมีราคาตลาดต่ำกว่าก็จะมีการลดกำลังผลิตและเพิ่มโหลดในพื้นที่นั้นๆ ส่วนราคาตลาดในพื้นที่ที่มีโหลดเกินจะมีราคาสูงขึ้นก็จะมีการลดโหลดและเพิ่มกำลังผลิต พื้นที่การเสนอซื้อหรือขายที่มีราคาตลาดต่างกันนี้เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วจะเรียกว่า ราคาพื้นที่ (Price area)

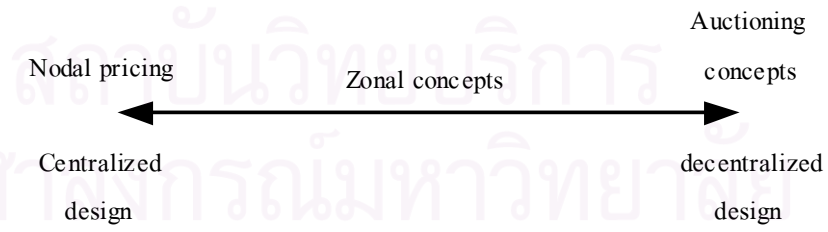
รายละเอียดเกี่ยวกับราคาพื้นที่นี้มีการจัดการทางการเงินที่น่าสนใจ ตลาดจะเป็นผู้ได้รับรายได้ซึ่งเรียกว่าค่าจัดการความคับคั่ง (Congestion rent) ในกรณีที่เกิดความคับคั่งในสายส่งตลาดจะซื้อพลังงานไฟฟ้าจากพื้นที่ที่ราคาตลาดต่ำเท่ากับขีดจำกัดในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและขายพลังงานไฟฟ้านี้ให้กับพื้นที่ที่มีราคาตลาดสูง ตลาดจะให้รายได้นี้แก่ศูนย์ควบคุมอิสระขณะที่รายได้นี้จะมีขีดจำกัดสูงสุดที่กำหนดโดยข้อกำหนดของตลาด รายได้นี้จะเปลี่ยนแปลงตามขีดจำกัดของสายส่ง ถ้าขีดจำกัดของสาย

ส่งสูงหรือไม่มีปัญหาในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ราคาตลาดก็จะเหมือนกันในทุกๆ พื้นที่หรือไม่เกิดรายได้จากการจัดการความคับคั่งนั่นเอง แต่ถ้าขีดจำกัดของสายส่งลดลงรายได้จากการจัดการความคับคั่งในสายส่งก็จะเพิ่มขึ้น

สำหรับวิธีการซื้อกลับนั้นจะมีการเสนอการซื้อหรือขายในลักษณะแบบขั้นบันไดซึ่งจะระบุราคาที่ผู้ผลิตไฟฟ้าต้องการได้รับเพื่อที่จะเพิ่มกำลังการผลิตหรือราคาที่โหลดได้รับในการลดการใช้กำลังไฟฟ้า และการเสนอราคาที่ผู้ผลิตจะต้องจ่ายเพื่อลดกำลังการผลิตหรือราคาที่โหลดต้องจ่ายในการเพิ่มการใช้กำลังไฟฟ้า วิธีที่แตกต่างกันนี้ไม่ได้อุปสรรคในการจัดการของกลุ่มประเทศแถบนอร์เวย์นี้เลยแต่ละวิธีมีใช้การใช้งานที่ประสานกันเป็นอย่างดี

2.4 การเปรียบเทียบของหลักการจัดการความคับคั่งในสายส่ง [8]

หลักการจัดการความคับคั่งในสายส่งเป็นการเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และแสดงให้เห็นว่าขึ้นอยู่กับการออกแบบของแต่ละตลาดและลักษณะของจัดการความคับคั่งในสายส่ง โดยทั่วๆ ไปจะมีการจัดการความคับคั่งจะอาศัยตลาดจากศูนย์กลางมากกว่าที่จะเป็นตลาดแบบกระจายซึ่งในการจัดการต้องอาศัยความเชื่อใจของการมีส่วนร่วมในการจัดสรรและการทำสัญญาทางการค้า ดังรูปที่ 2.11 เป็นการแสดงให้เห็นถึงกรอบกว้างๆ ของการแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่ง โดยการจัดการด้วยการคิดราคาตามโหนดจะต้องมีการจัดการจากศูนย์กลางจากตลาดกลาง และยังมีตลาดที่อาศัยช่วงที่แตกต่างระหว่างโหนดที่มีการประมูลโดยไม่ต้องอาศัยการจัดสรรจากศูนย์กลางแต่ต้องอาศัยการทำตลาดในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งหลักการของการกระจายจะอาศัยความแน่นอนในการประมูล



รูปที่ 2.11 การออกแบบและการจัดการความคับคั่ง

ในตลาดไฟฟ้าทั่วๆไปจะไม่มีการยืนยันว่ามีวิธีที่ถูกต้องในการจัดการความคับคั่งในสายส่ง เพราะการจัดการความคับคั่งในแต่ละตลาดจะต้องอาศัยลักษณะโครงข่ายสายส่ง, ความหนาแน่นของประชากร, อิทธิพลของการเมือง, ลักษณะทางกายภาพของแต่ละพื้นที่ เพื่อช่วยเป็นแนวทางในการจัดการความคับคั่ง ในปัจจุบันไม่มีวิธีไหนดีที่สุดเพียงแต่ปัจจุบันการคิดราคาตามโหนดได้รับความสำเร็จในตลาดเป็นที่ยอมรับในระดับหนึ่ง

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบตลาดไฟฟ้าระหว่างระบบ NETA ของประเทศอังกฤษและเวลส์กับระบบ Power Pool ของประเทศต่างๆ ซึ่งมีข้อเปรียบเทียบดังนี้

รายละเอียด	NETA	แคลิฟอร์เนีย	PJM	ออสเตรเลีย	นอร์ดพูล
1. ตลาดล่วงหน้า	มี	มี	มี	ไม่มี	มี
2. Demand-Side Participation	มี	มี	มี	มี	มี
3. การเสนอซื้อขาย (Bid-Offer)	มี	มี	มี	ไม่มี	มี
4. การตกลงแบบคู่สัญญา (Bilateral)	มี	มี	ไม่มี	มี	ไม่มี
5. ตลาดแบบ Real-Time หรือใกล้ Real-Time	มี	มี	มี	ไม่มี	มี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 สรุปเกี่ยวกับหลักการของการจัดการความคับคั่ง การออกแบบของตลาดและการใช้ประโยชน์

	คุณสมบัติหลัก	Auctioning	ตัวอย่าง ตลาดที่ใช้งาน
การคิดราคาตามโหนด	ต้องการการจัดสรรจากศูนย์กลาง , ต้องกลางความร่วมมือจากทุกส่วน , ใช้ FTR ในการลดความเสี่ยง	implicit	PJM, นิวอิงแลนด์, นิวยอร์ก, สิงคโปร์ , ไอรีแลนด์, เทกซัส และแคลิฟอร์เนีย
การคิดราคาตามเขต	ประยุกต์ใช้การจัดสรรจากศูนย์กลาง (ออสเตรเลีย) หรือใช้การแยกตลาด (นอร์ตพูล) ใช้ CFD ในการลดความเสี่ยง	implicit	ออสเตรเลีย นอร์ตพูล
การคิดราคาเท่ากันทั้งหมด	ไม่มีการพิจารณาการจัดการความคับคั่งในตลาดล่วงหน้า , การปรับเปลี่ยนกำลังการผลิต หรือใช้วิธีซื้อกลับคืนในการจัดการความคับคั่ง	na	ฟินแลนด์, สวีเดน , อังกฤษและเวลส์

การจัดการความคับคั่งของสายส่งในแต่ละประเทศมีความแตกต่างกันตามรูปแบบตลาดและพัฒนาการในกระบวนวิธีโดยไม่มีรูปแบบสำเร็จที่แน่นอน การจัดการดังกล่าวมีทั้งที่แฝงในราคาค่าใช้สายส่งไฟฟ้าโดยมีทั้งที่จ่ายเป็นค่าชดเชยและมีทั้งที่เป็นรูปแบบของตลาดที่มีการเสนอซื้อหรือขายเพื่อแก้ปัญหาความคับคั่ง และสำหรับตลาดที่ไม่มีรูปแบบการแก้ปัญหาความคับคั่งที่ชัดเจนจะก่อให้เกิดปัญหาในด้านการสะท้อนต้นทุนหรือค่าการเสียโอกาสที่เป็นจริง อย่างไรก็ตามการจัดการความคับคั่งอย่างเป็นระบบของสายส่งมีความจำเป็นเพราะหากปราศจากการจัดการความคับคั่งดังกล่าวแล้วย่อมอาจก็ให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ผิดจากความเป็นจริงที่ควรจะเป็น อีกทั้งไม่เป็นการสร้างแรงจูงในการก่อสร้างระบบสายส่งที่เพียงพอและไม่เป็นการสร้างแรงจูงต่อผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าในการช่วยกันแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่ง

บทที่ 3

โครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในประเทศไทยและการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสม

สิ่งสำคัญที่สุดของตลาดไฟฟ้าทั่วโลกในปัจจุบันคือการเตรียมตัวรับกับการแข่งขันที่มากขึ้นเนื่องจากต้องมีการปรับโครงสร้างเพื่อสร้างความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้าให้มากขึ้น ดังนั้นเรื่องปฏิบัติการเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีความสำคัญมากเพื่อสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ต้องมีการวางแผนและปฏิบัติการใหม่ในการจัดสรรการส่งจ่ายเพื่อรองรับกับแนวความคิดที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม โดยกระบวนการต้องสะท้อนความคุ้มค่าทางด้านการเงินทั้งในส่วนของการดำเนินการและการบำรุงรักษา โดยในส่วนของการดำเนินการจะเพิ่มการจัดการความคับคั่งในสายส่งซึ่งการบรรเทาปัญหาเรื่องความคับคั่งต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกส่วนของตลาดภายใต้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

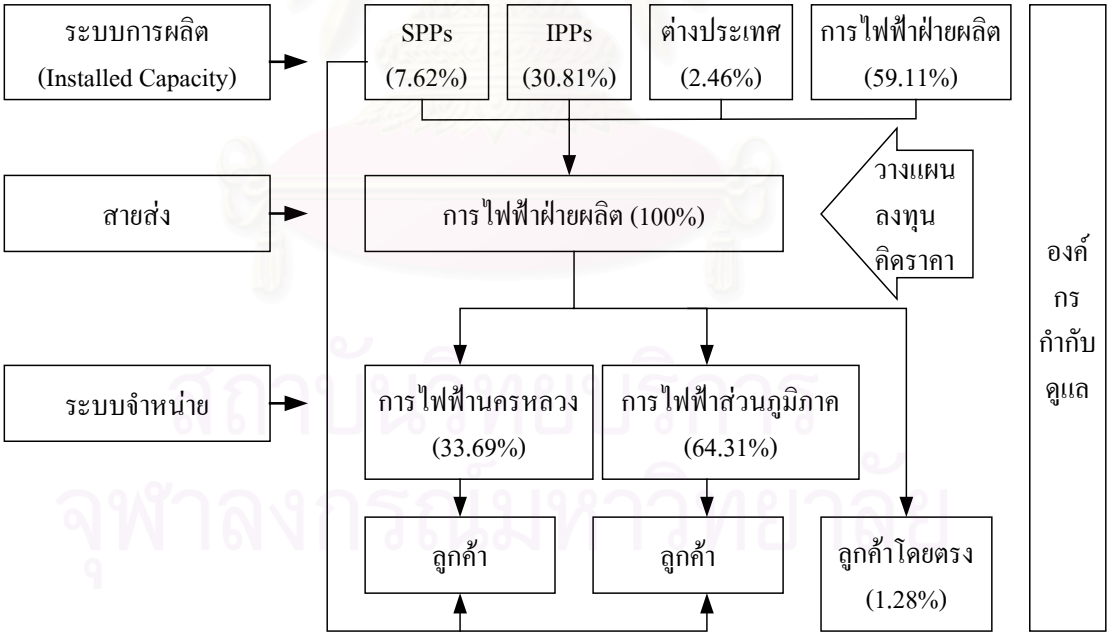
3.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย [10, 26]

สำหรับในช่วงสิบปีที่ผ่านมาการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจในทวีปเอเชียมีมากขึ้นส่งผลให้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นในส่วนของประเทศไทยเองก็มีการให้ความสำคัญกับเรื่องนี้มาตลอดโดยมีหน่วยงานหลักที่ทำการดูแลนโยบายคือกระทรวงพลังงานที่มีสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สนพ.) เป็นหน่วยงานที่ดูแลรับผิดชอบนโยบายการผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะมีหน่วยงานหลักที่ดูแลเรื่องการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าของประเทศไทยคือการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและยังมีหน่วยงานอื่นที่ทำหน้าในการผลิตไฟฟ้าในบางส่วนคือผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producers : IPP) และผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Small Power Producers : SPP) ซึ่งจะเห็นได้ว่าก่อนจะเกิดปัญหาเศรษฐกิจในปี 2540 ประเทศไทยมีการผูกขาดในธุรกิจผลิตไฟฟ้าเพียงรายเดียวคือการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งราคาที่ขายก็จะเป็นราคาเฉลี่ยของต้นทุนทั้งหมดแต่หลังจากเกิดปัญหาเศรษฐกิจขึ้นก็เริ่มมีการวางแผนเพื่อปรับปรุงเรื่องโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าเพื่อให้มีความเข้มแข็งและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งมีการอ้างอิงจากตลาดที่มีการแข่งขันอย่างสมบูรณ์จากตัวอย่างของต่างประเทศที่ประสบความสำเร็จในการปรับโครงสร้างและพบว่าส่วนมากประเทศเหล่านี้มีการซื้อขายจากตลาดกลางตามราคาหน่วยสุดท้ายของการผลิตการพิจารณาในเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลากำหนด

จากแนวโน้มของหลายๆ ประเทศจะพบว่าเมื่อมีการแข่งขันในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้นก็จะส่งผลทำให้ราคาของไฟฟ้าถูกลงส่งผลดีกับผู้ไฟฟ้าโดยรวม แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการแข่งขัน

ของกิจการไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดปัญหาอย่างหนึ่งคือปัญหาความคับคั่งในสายส่งซึ่งเป็นปัญหาที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ดังนั้นในการพิจารณาเรื่องความคับคั่งจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมากในหลายๆ ประเทศทั่วโลกซึ่งประเทศไทยควรให้ความสำคัญกับเรื่องนี้เช่นกัน

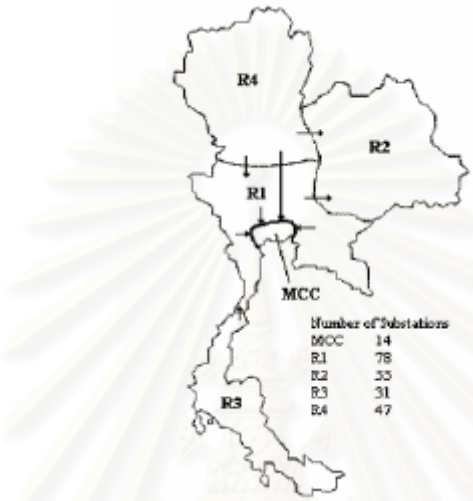
ประเทศไทยมีการทำการกิจการไฟฟ้าโดย 3 หน่วยงานหลักของประเทศคือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, การไฟฟ้านครหลวงเป็นเวลานานเกิบ 50 ปีแล้ว โดยมีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตทำหน้าที่ในการผลิตและส่งไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าและมีการไฟฟ้านครหลวงทำหน้าจำหน่ายไฟฟ้าให้กับลูกค้าในเขตกรุงเทพฯ, สมุทรปราการ และนนทบุรี ส่วนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทำหน้าที่จำหน่ายไฟฟ้าให้กับจังหวัดที่เหลือ จากข้อมูลปี 2547 พบว่าประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้า 25,969 MW โดยมีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นเจ้าของโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ของประเทศประมาณ 59.11% และนอกจากนี้ยังมีผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (IPP) มีกำลังการผลิตประมาณ 30.81% และผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (SPP) มีกำลังการผลิตประมาณ 7.62% และในส่วนที่รับซื้อมาจากต่างประเทศ 2.46% และในส่วนของการจำหน่ายไฟฟ้าจะแบ่งเป็น การจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงประมาณ 33.89%, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคประมาณ 64.31%, ขายตรงให้ลูกค้าประมาณ 1.28% ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในประเทศไทย (ข้อมูลปี2547) [10]

โดยที่กำลังไฟฟ้าติดตั้งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะประกอบด้วย 24.5% ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน, 18.1% เป็นโรงไฟฟ้าความร้อนร่วม, 13% เป็นโรงไฟฟ้า

พลังน้ำ, 3% เป็นโรงไฟฟ้าพลังก๊าซ และพลังงานอื่นๆ โดยในการแบ่งเขตในการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าจะมี 5 เขต คือ เขตกรุงเทพฯ ปริมณฑลและแบ่งตามภูมิภาคอีก 4 เขต คือ เขตภาคกลาง 23 จังหวัด, เขตภาคเหนือ 14 จังหวัด, เขตภาคใต้ 16 จังหวัด, เขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 19 จังหวัด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยระดับแรงดันที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้ามีตั้งแต่ 500 kv, 230 kv, 132 kv, 115 kv, 69 kv ตามลำดับ



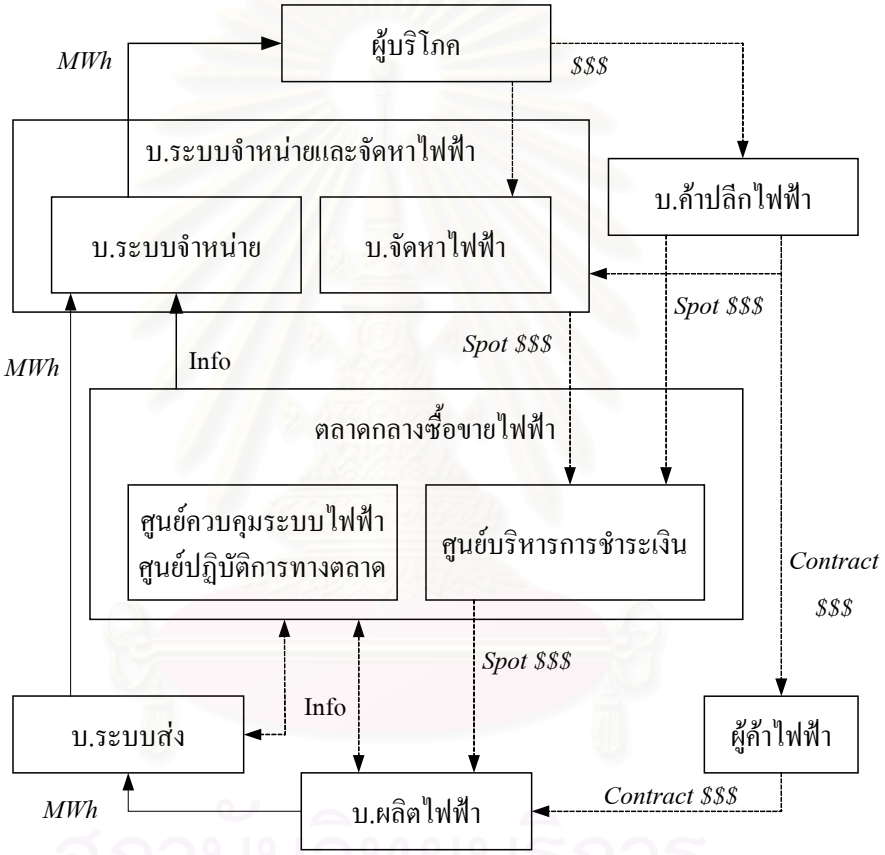
รูปที่ 3.2 แบ่งเขตการจ่ายไฟฟ้า

3.2 การเปลี่ยนแปลงกิจการไฟฟ้าของประเทศไทย

นับตั้งแต่เกิดปัญหาเศรษฐกิจปี 2540 ทางประเทศไทยได้มีการวางแผนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีการนำเสนอโครงสร้างกิจการไฟฟ้าใหม่จากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติซึ่งเสนอให้มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าเริ่มจากการศึกษาเรื่องตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power pool), ตลาดที่ใช้ระบบ NESA, ตลาดที่ใช้ระบบ ESB ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามความไม่แน่นอนของกิจการไฟฟ้าในประเทศไทยมีมากดังนั้นการศึกษาเรื่องการจัดการความคับคั่งจึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต แต่ก่อนที่จะทำการศึกษาเรื่องการจัดการความคับคั่งในวิทยานิพนธ์จะนำเสนอถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของกิจการไฟฟ้าตั้งแต่หลังเกิดปัญหาเศรษฐกิจปี 2540 เพื่อเป็นแนวทางและแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นดังแสดงต่อไปนี้

3.2.1 ระบบตลาดกลางไฟฟ้า (Power pool) [9, 15, 16, 21]

โครงสร้างของตลาดกลางไฟฟ้าประกอบด้วยสมาชิกในตลาดทั้งฝ่ายที่เป็นผู้ซื้อหรือผู้ใช้ไฟฟ้าและฝ่ายที่เป็นผู้ขายหรือผู้ผลิตไฟฟ้าโดยมีหน่วยงานกลางซึ่งมีหน้าที่ในการกำหนดกฎเกณฑ์ของตลาด, ประสานงานระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้า, ควบคุมการดำเนินงานของระบบไฟฟ้า รวมถึงการจัดการทางด้านการเงินโดยความสัมพันธ์ของสมาชิกในตลาดและหน่วยงานกลางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างและความสัมพันธ์ของตลาดกลางไฟฟ้า

รายละเอียดหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังนี้

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power pool)

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าประกอบด้วย ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระ (ISO) มีหน้าที่สั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยจะประสานงานกับศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด (Market Operator : MO) และศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระจะทำการเลือกโรงไฟฟ้าที่เสนอราคาต่ำสุดให้เดินเครื่องก่อนและเป็น

ผู้ควบคุมการปฏิบัติการของบริษัทระบบส่งไฟฟ้ารวมถึงทำการปฏิบัติงานร่วมกับศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด ส่วนศูนย์บริหารการชำระเงิน (Settlement Administrator : SA) จะทำหน้าที่ทำความตกลงทางด้านการชำระเงินค่าซื้อไฟฟ้าซึ่งอาจจะทำรวมอยู่กับตลาดกลางหรืออาจจะแยกออกไปดำเนินการโดยเป็นองค์กรเอกเทศได้

บริษัทผลิตไฟฟ้า (Generation Company : GenCo)

บริษัทผลิตไฟฟ้าจะมีการแข่งขันเพื่อที่จะประมูลเสนอราคาพลังงานไฟฟ้า เข้าสู่ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าบริษัทผลิตไฟฟ้าเหล่านี้อาจจะเป็นโรงไฟฟ้าในปัจจุบัน, ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer : IPP), ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer : SPP), หรือผู้ผลิตไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน

บริษัทระบบส่งไฟฟ้า (GridCo)

บริษัทระบบส่งไฟฟ้าเป็นเจ้าของและทำหน้าที่ดูแลบำรุงรักษาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายใต้สัญญาที่ทำกับศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระ บริษัทระบบส่งไฟฟ้าจะต้องไม่มีความเกี่ยวข้องใดๆ กับหน่วยงานอื่นๆ โดยเฉพาะหน่วยงานที่ไม่อยู่ภายใต้การกำกับดูแลโดยองค์กรกำกับดูแล และควรจะเป็นคนละองค์กรกับศูนย์ควบคุมระบบ (System operator)

บริษัทระบบจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้า (Regulated Electricity Delivery Company : REDCO)

บริษัทระบบจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้านี้เกิดจากการรวมกันของบริษัทจัดหาไฟฟ้า (SupplyCos) และบริษัทระบบจำหน่ายไฟฟ้า (DisCos) ซึ่งอยู่ภายใต้การกำกับดูแลขององค์กรของรัฐ บริษัทจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้ามีหน้าที่จัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า ณ ราคาตลาดในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Spot price) บวกด้วยอัตราค่าบริการจัดจำหน่าย (ซึ่งควบคุมโดยองค์กรกำกับดูแล)

บริษัทค้าปลีกไฟฟ้า (RetailCo)

บริษัทค้าปลีกไฟฟ้าเป็นธุรกิจที่เปิดให้มีการแข่งขันอย่างเสรี บริษัทค้าปลีกไฟฟ้าจะแข่งขันให้บริการจัดการด้านความเสี่ยงจากราคาค่าไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงในตลาดกลางและให้บริการเสริมด้านไฟฟ้าอื่นๆ

ผู้ค้าไฟฟ้า (Trader)

ผู้ค้าไฟฟ้าเป็นหน่วยงานที่ซื้อหรือขายพลังงานโดยไม่มีหน่วยผลิตไฟฟ้าเป็นของตนเองแต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าหรือผู้ค้าปลีกไฟฟ้าหรือเป็นผู้บริหารสัญญาซื้อขายไฟฟ้าระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้า (Power Purchase Agreement : PPAs) โดยมีการดำเนินงานในตลาดเสมือนว่าสัญญาซื้อขายนั้นเป็นโรงไฟฟ้าโรงหนึ่ง

จากการให้คำอธิบายในเบื้องต้นเห็นได้ว่าสามารถแบ่งหน่วยงานต่างๆ ในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าออกเป็นหน่วยงานที่อยู่ภายใต้การกำกับดูแลและหน่วยงานที่มีการแข่งขัน ในส่วนของหน่วยงานที่อยู่ภายใต้การกำกับดูแลจะประกอบด้วยบริษัทระบบส่งไฟฟ้า (GridCo), บริษัทระบบจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้า(REDCo) และตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power pool) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่และบทบาทการดำเนินการที่ชัดเจนทำให้ง่ายต่อการจัดการและกำกับดูแล โดยหน่วยงานเหล่านี้ประกอบด้วย บริษัทผลิตไฟฟ้า (GenCo), บริษัทค้าปลีกไฟฟ้า (RetailCo)และผู้ค้าไฟฟ้า (Trader) ซึ่งจะมีการแข่งขันกันให้บริการแก่ผู้บริโภคตั้งแต่ในส่วนของการผลิตและการค้าปลีกไฟฟ้า, การจัดตั้งบริษัทค้าปลีกไฟฟ้าและผู้ค้าไฟฟ้าโดยมีความต้องการของตลาดเป็นกลไกกำหนด

ภายใต้โครงสร้างกิจการไฟฟ้าที่นำเสนอในรูปที่ 3.3 นั้นพบว่าตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าเป็นหน่วยงานสำคัญ ซึ่งมีหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือ

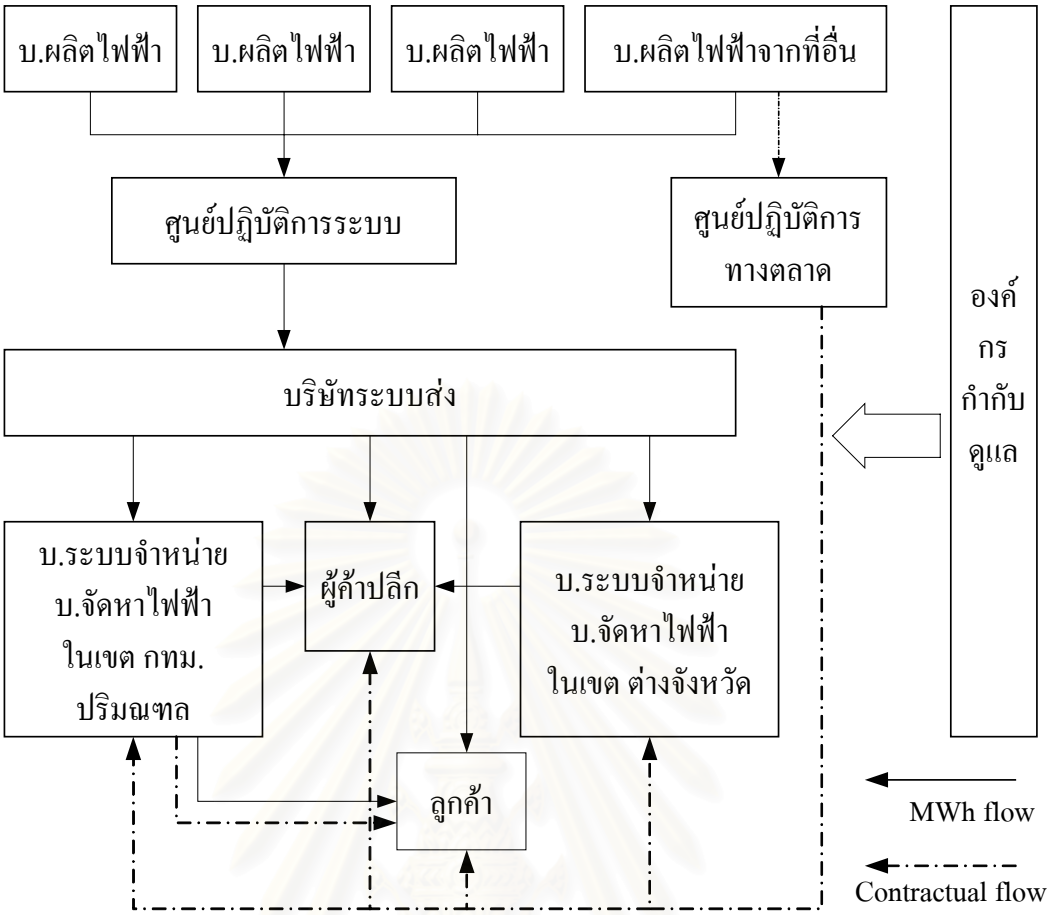
1. เป็นศูนย์กลางการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างผู้ผลิตกับผู้ค้าปลีก
2. เป็นกลไกในการบริหารงานของระบบไฟฟ้า เช่น การสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเพื่อให้มีการสั่งเดินเครื่องจากโรงไฟฟ้าที่เสนอราคาต่ำสุดก่อน

อย่างไรก็ตามการดำเนินตลาดแบบตลาดกลางจำเป็นต้องมีความเข้มแข็งของผู้ใช้ไฟฟ้าและสมาชิกทั้งหมดในตลาด เพื่อจะทำให้เกิดความเข้มแข็งของระบบไฟฟ้าซึ่งจะเห็นได้ว่าในการดำเนินการด้วยตลาดกลางจะมีความซับซ้อนมากในด้านกายภาพเพราะในการดำเนินการต้องพิจารณาผลกระทบหลายๆ ด้าน ทั้งเรื่องความมั่นคงของพลังงาน, ความเสมอภาค, ความโปรงใส แต่อย่างไรก็ตามทางสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติได้นำเสนอโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าใหม่เป็นระบบ NESA (New Electricity Supply arrangement) โดยมีการอ้างอิงจากระบบ NETA (New Blectricity Trading Arrangement) ซึ่งเป็นการอ้างอิงจากตลาดไฟฟ้าของประเทศอังกฤษที่มีการเปลี่ยนแปลงใหม่ ที่มีการปรับปรุงเพื่อต้องการให้เห็นทางเลือกในการซื้อขายไฟฟ้าส่งผลทำให้ราคาไฟฟ้าสะท้อนต้นทุนที่แท้จริง, เป็นธรรม และมีความโปรงใสซึ่งระบบ NESA จะทำให้อำนาจต่อรองของผู้ซื้อไฟฟ้าสูงขึ้น

3.2.2 ระบบ NESA (New Electricity Supply arrangement)

ระบบ NESA เป็นระบบซึ่งแตกต่างจากระบบตลาดกลางคือไม่ต้องซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางแต่การซื้อขายไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบสัญญาระหว่างผู้ผลิตกับผู้ซื้อไฟฟ้า (Bilateral contract) มีผู้จัดการระบบเพื่อสร้างความสมดุลในระบบไฟฟ้า (Balacing mechanism) ไม่ให้ไฟฟ้าขาดหรือเกินและมีตลาดซื้อขายไฟฟ้า (Power exchange) เพื่อให้ผู้ซื้อขายสามารถทำสัญญาระยะยาวประกันความเสี่ยงหรือสัญญาล่วงหน้าได้ ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า (System Operator : SO) จะมีหน้าที่ในการรักษาความสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานในระบบไฟฟ้าและรักษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้า โดยผู้ผลิตไฟฟ้าจะเสนอราคาเฉพาะส่วนของการเพิ่มหรือลดการผลิตจากสัญญา Bilateral ที่มีกับผู้ซื้อไฟฟ้าและจะดูแลระบบเฉพาะส่วนที่อุปทานรวมแตกต่างจากอุปสงค์รวม (Imbalance) แต่ทั้งนี้ยังต้องมีองค์กรกำกับดูแล (Regulator) คอยดูแลไม่ให้มีการเอาเปรียบผู้ใช้ไฟฟ้า แต่ในขณะเดียวกันให้ความเป็นธรรมแก่ผู้ประกอบการทุกๆ รายอย่างเท่าเทียมกัน ระบบ NESA เป็นระบบที่เหมาะสมเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าระบบตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าเพราะมีเสถียรภาพเนื่องจากราคาค่าไฟฟ้าจะเฉลี่ยระหว่างราคาสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาทุกสัญญาและป้องกันการผูกขาดการกำหนดราคาโดยผู้ผลิตน้อยรายเพราะมีการทำสัญญาระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าแต่ละราย อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือตลาดไฟฟ้าต้องมีการแข่งขันอย่างแท้จริงทั้งระบบการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า และต้องเป็นระบบที่ไม่สร้างแรงจูงใจให้มีการบิดเบือนในตลาด ทั้งนี้ควรแยกกิจการสายจำหน่าย (Distribution) ออกจากการจัดหาไฟฟ้า (Supply) และแยกการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายออกเป็นหลายๆ บริษัท นอกจากนี้ในการกระจายหุ้นให้แก่ประชาชนต้องมั่นใจว่าเงินที่ได้จากการระดมทุนจะต้องนำไปดำเนินการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ถือหุ้นอย่างแท้จริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



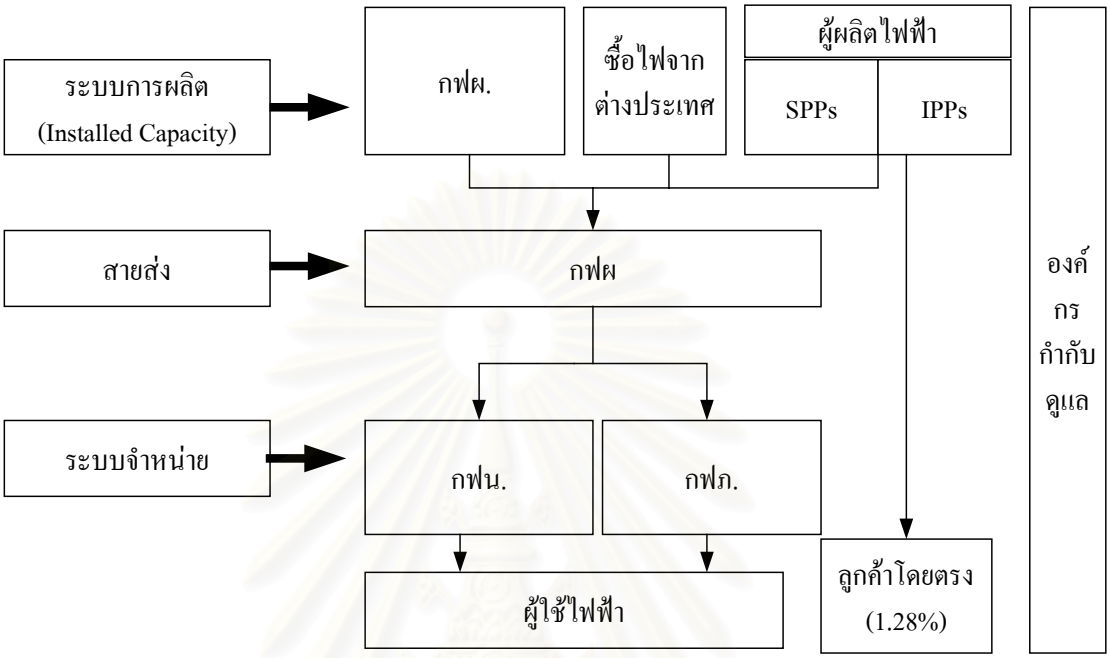
รูปที่ 3.4 โครงสร้างและความสัมพันธ์ของระบบ NESA

3.2.3 ระบบ ESB (Enhanced Single Buyer Model)

รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบ ESB เป็นการปรับปรุงจากระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบันซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยยังคงเป็นผู้ดำเนินการผลิตและระบบส่งไฟฟ้า รวมทั้งยังเป็นผู้ซื้อรายเดียว ส่งกระแสไฟฟ้าขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายแต่จะแบ่งแยกบัญชีระหว่างกิจการผลิตไฟฟ้าและกิจการส่งไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความชัดเจนและโปร่งใสมากขึ้น

ในส่วนของการดำเนินงานของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยังเป็นผู้ดำเนินการระบบจำหน่ายและการค้าปลีกไฟฟ้าภายในเขตพื้นที่รับผิดชอบของตนเองโดยมีการแยกทางบัญชีระหว่างธุรกิจสายจำหน่ายและการจัดหาไฟฟ้าเพื่อส่งเสริมประสิทธิภาพในการดำเนินงานและป้องกันการอุดหนุนรายได้ระหว่างกัน นอกจากนั้นเพื่อให้กิจการไฟฟ้าเกิดการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพจะมีการจัดตั้งองค์กรกำกับดูแล (Regulator) คอยกำกับดูแลให้เกิดความโปร่งใสในการสั่งจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยตรวจสอบการทำงานของศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าทำหน้าที่สั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้ารวมทั้งคอยดูแลให้มีกระบวนการแข่งขันสร้างโรงไฟฟ้าใหม่โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนที่สนใจสามารถร่วมประมูลราคาแข่งขันในการสร้างโรง

ไฟฟ้าใหม่ได้ ซึ่งการจัดตั้งองค์กรกำกับดูแลนี้จะทำให้ระบบมีความมั่นคงสามารถรักษาระดับราคาและคุณภาพของการบริการให้มีความเหมาะสมเพื่อคุ้มครองผู้บริโภคได้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างและความสัมพันธ์ของระบบ ESB

ระบบรูปแบบ ESB ถือได้ว่าเป็นโครงสร้างกิจการไฟฟ้าที่พัฒนาจากเดิมที่มีความมั่นคงแต่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าให้มีความชัดเจน, โปร่งใส และตรวจสอบได้ โดยการแยกบัญชีของกิจการที่เกี่ยวเนื่องกันอย่างชัดเจน และมีการกำกับดูแลผลประโยชน์ของทุกฝ่ายโดยองค์กรกำกับดูแลที่อยู่ภายใต้กระทรวงพลังงาน โดยเปิดโอกาสให้เอกชนสามารถเข้ามาแข่งขันในการผลิตไฟฟ้าใหม่ได้ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อประชาชนผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วประเทศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสม

สิ่งสำคัญในการศึกษาและการจำลองการทำงานเพื่อจัดการปัญหาความคับคั่งในสายส่งคือเครื่องมือที่ใช้คำนวณ, เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของกิจกรรมต่างๆ ในตลาดไฟฟ้าได้ เช่น การจัดกำลังการผลิตเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม เป็นต้น เครื่องมือที่มีความสามารถดังกล่าวนี้คือการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม

กำลังการไหลที่เหมาะสมคือการจัดสรรกำลังการผลิตให้สอดคล้องกับการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยคำนึงถึงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow equation) และข้อจำกัดด้านต่างของระบบโดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ดำเนินการหรือผู้ทำการวิเคราะห์

ตัวอย่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นิยมใช้งานดังนี้

- ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง
- กำลังการสูญเสียรวมในระบบส่ง
- ขนาดหรือจำนวนการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในระบบ
- การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง
- ต้นทุนด้านการเงินต่างๆ ที่สามารถสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในระบบ

อย่างไรก็ตามหากต้องการวิเคราะห์การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัดเราสามารถใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง แต่เนื่องจากในตลาดกลางไฟฟ้านั้นจะถูกแทนที่ด้วยข้อมูลราคาการเสนอขาย

ส่วนข้อจำกัดต่างๆ ในระบบที่นอกเหนือจากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า เช่น พิกัดกำลังของสายส่ง, กำลังการผลิตส่งผ่านระหว่างบริเวณ (Power interchange), อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (Generation ramp rate) นั้นสามารถนำมาพิจารณาร่วมกันได้หากผู้ทำการวิเคราะห์ต้องการจัดสรรกำลังการผลิตที่สอดคล้องกับข้อจำกัดนั้นๆ

โดยสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม คือ การจัดสรรกำลังการผลิตที่เหมาะสมโดยที่ระบบสามารถปฏิบัติการได้จริงตามข้อจำกัดของระบบที่ได้กำหนดไว้

ความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม
2. การวิเคราะห์การไหลของโหลด

3.4 วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม [22, 23]

วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสมมีหลายวิธี โดยแต่ละวิธีการนั้นจะมีลักษณะและวิธีการใช้งานต่างกันออกไป ซึ่งวิธีการคำนวณแต่ละแบบนั้นต่างอาศัยหลักการพื้นฐานที่เหมือนกันคือ สมการลากรอง (Lagrange equation) และเงื่อนไขจำเป็น (Necessary condition) ของ Karush Kuhn Tucker (KKT) ในการแก้ปัญหาเพื่อคำนวณค่าเหมาะสม (Optimization) โดยการคำนวณตามหลักการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสมสามารถเขียนรูปแบบของปัญหาในสมการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปดังนี้

$$\begin{aligned} &\textit{Minimize} && F(x) \\ &\textit{subject to} && g(x) = 0 \\ & && h(x) \le 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

โดย $F(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการคำนวณ ส่วนข้อจำกัด $g(x)$ และ $h(x)$ คือข้อจำกัดหรือเงื่อนไขของระบบในรูปของสมการและอสมการ ตามลำดับ

คำตอบของ (3.1) สามารถหาได้โดยเงื่อนไขจำเป็นของ Karush Kuhn Tucker (KKT) จากสมการลากรอง $L(x, \lambda, \mu)$ ดังแสดงต่อไปนี้

$$L(x, \lambda, \mu) = F(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x) \tag{3.2}$$

กำหนดให้ x^*, λ^*, μ^* เป็นเวกเตอร์ตัวแปร ณ จุดคำตอบของชุด (3.1) จะได้ว่าสมการต่อไปนี้จะต้องเป็นจริง คือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_r} = \frac{\partial (F(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x))}{\partial x_r} \Big|_{x^*, \lambda^*, \mu^*} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_s} = g_s(x) \Big|_{x^*} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu_t} = h_t(x) \Big|_{x^*} = 0 \quad : \mu_t > 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu_t} = h_t(x) \Big|_{x^*} \le 0 \quad : \mu_t = 0 \end{aligned} \tag{3.3}$$

โดย $\mu_t \ge 0$ และ r,s,t คือลำดับที่สมาชิกของเวกเตอร์ x, λ, μ ตามลำดับ

วิธีการสำคัญในการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ดังนี้

3.4.1 วิธีการวนซ้ำเพื่อหาค่าแลมบ์ดา (Lambda iteration method)

วิธีการนี้เป็นวิธีการทั่วไปในการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด (Economic dispatch) โดยสมมุติในกรณีที่ระบบมีข้อจำกัดสมดุลกำลังงานเพียงสมการเดียว หลักการในการคำนวณคือเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าแลมบ์ดาจากนั้นหาค่ากำลังการผลิตของบัสต่างๆ จาก (3.3) หากรวมกำลังการผลิตที่ได้แล้วไม่เท่ากับโหลดทั้งหมดของระบบก็จะทำการปรับค่าแลมบ์ดาใหม่ทำเช่นนี้ซ้ำจนกว่ากำลังการผลิตรวมนะเท่ากับโหลดทั้งหมดของระบบ

อย่างไรก็ตามจะพบว่าหากใช้วิธีการนี้ในการคำนวณการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสมจะมีความยุ่งยากในการคำนวณซ้ำเกิดขึ้นเนื่องจากตัวคูณสัมประสิทธิ์ในสมการลากรองอาจมีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับจำนวนของสมการข้อจำกัดและอสมการข้อจำกัดที่มีผล (Active inequality constraint) การปรับค่าแลมป์ใหม่ให้เหมาะสมจึงต้องอาศัยวิธีการที่เหมาะสมซึ่งกระทำได้ง่าย

ความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบของสมการนี้ขึ้นอยู่กับวิธีในการปรับค่าแลมป์ดาหรือสัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการลากรองเป็นสำคัญ

3.4.2 วิธีการใช้เกรเดียนท์ (Gradient method)

หลักการของวิธีการใช้เกรเดียนท์คือการใช้เกรเดียนท์ของสมการลากรอง $L(x,\lambda,\mu)$ เป็นเวกเตอร์กำหนดทิศทางในการลู่เข้าหาคำตอบ (Steepest descent direction) ดังสมการต่อไปนี้

$$x^{i+1} = x^{i} - \alpha \nabla L \tag{3.4}$$

โดยที่ค่า x^{i} เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรการคำนวณทั้งหมดในรอบที่ i และ α เป็นปริมาณ สเกลาร์เพื่อกำหนดขนาดของการปรับค่าเข้าหาจุดคำตอบ ส่วน ∇L เป็นเวกเตอร์เกรเดียนท์ของสมการลากรอง $L(x,\lambda,\mu)$ ดังแสดงใน (3.5)

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x_1} \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

โดยที่ n คือ จำนวนตัวแปรในการคำนวณทั้งหมด

ข้อเสียของการใช้วิธีเกรเดียนท์คือความล่าช้าในการลู่เข้าหาจุดคำตอบและความไม่เหมาะสมในการคำนวณการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสมหากในการคำนวณนั้นมีข้อจำกัดแบบอสมการรวมอยู่ด้วย

3.4.3 วิธีของนิวตัน (Newton 's method)

ในวิธีการของนิวตันนี้เป็นการนำการกระจายอนุกรมเทเลอร์อันดับที่หนึ่งมาใช้ในการแก้ปัญหาสมการเงื่อนไขจำเป็นของ Karush-Kuhn-Tucker ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ

$$x^{i+1} = x^i - \left[\frac{\partial \nabla L}{\partial x}\right]^{-1} \nabla L \tag{3.6}$$

โดย x^i เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรในการคำนวณทั้งหมดในรอบที่ i ส่วน ∇L และ $\left[\frac{\partial \nabla L}{\partial x}\right]$ มีค่าตาม (3.7) และ (3.8) ตามลำดับ

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x_1} \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\left[\frac{\partial \nabla L}{\partial x}\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial x_1 x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 L}{\partial x_1 x_n} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial x_2 x_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial x_2 x_2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 L}{\partial x_n x_1} & & \cdots & \frac{\partial^2 L}{\partial x_{n1}^2} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

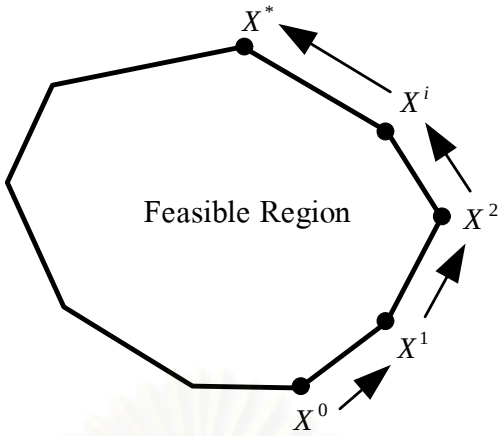
โดยที่ n คือ จำนวนตัวแปรในการคำนวณทั้งหมด

ในวิธีการของนิวตันนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการของเกรเดียนท์คือสามารถลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วกว่าอย่างไรก็ตามในวิธีการของนิวตันนี้ยังคงมีปัญหาในการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสมในกรณีที่ระบบมีข้อจำกัดแบบอสมการร่วมอยู่ด้วย

3.4.4 วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming method)

วิธีโปรแกรมเชิงเส้นนี้มีข้อได้เปรียบเหนือวิธีการทั้งสามข้างต้นคือสามารถคำนวณการไหลที่เหมาะสมได้ง่ายแม้ในระบบจะมีข้อจำกัดแบบอสมการร่วมอยู่ด้วย อย่างไรก็ตามหากพิจารณาข้อจำกัดของระบบทั้งที่เป็นสมการและอสมการจะพบว่ามีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ เช่น สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า อสมการพิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าบนสายส่ง ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization method)

โดยความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบจะขึ้นอยู่กับจุดเริ่มต้นของระบบในการหาคำตอบและจำนวนข้อจำกัดของระบบ เนื่องจากจุดคำตอบของระบบสมการในการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสมจะอยู่บนจุดยอด (Vertex) ของบริเวณเซตของจุดคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible region) โดยวิธีการหาคำตอบของวิธีโปรแกรมเชิงเส้น คือการเคลื่อนจุดคำตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนกว่าจะพบคำตอบที่เป็นค่าเหมาะสมที่สุด ดังนั้นหากมีข้อจำกัดของระบบอยู่มากและจุดเริ่มต้นของการคำนวณห่างไกลจุดคำตอบสุดท้ายจะทำให้จำนวนรอบการหาจุดคำตอบมากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.6

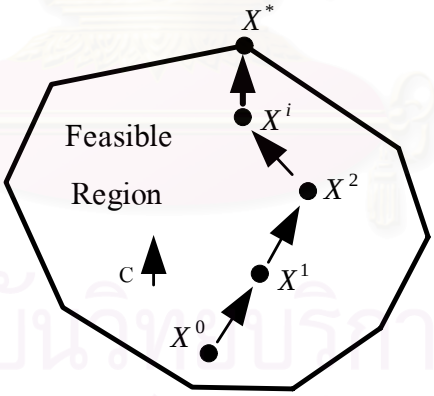


รูปที่ 3.6 การเคลื่อนจุดคำตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย

โดย x^0 คือ เวกเตอร์จุดคำตอบเริ่มต้นในการคำนวณ และค่า x^* คือ เวกเตอร์จุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณ

3.4.5 วิธีการใช้จุดคำตอบภายใน (Interior point method)

ในวิธีการนี้จุดคำตอบทุกๆรอบในการคำนวณจะอยู่ภายในบริเวณคำตอบที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเคลื่อนจุดคำตอบภายใน Feasible Region จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย

โดย x^0 คือ เวกเตอร์จุดคำตอบเริ่มต้นในการคำนวณ และค่า x^* คือ เวกเตอร์จุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณ ส่วน C คือ ทิศทางในการลู่เข้าหาคำตอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.6 วิธี Sequential Quadratic Programming [24]

วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี Sequential Quadratic Programming : SQP เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและประสบความสำเร็จในเทคนิคในการแก้ปัญหาสำหรับข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยประเด็นสำคัญของหลักการจะอาศัย Search direction ในการแก้ปัญญา Quadratic program ซึ่งปัญหาจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในรูปของ Quadratic และข้อจำกัดจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ในการนำเสนอเพื่อหาความเหมาะสมจะใช้กฎโดยทั่วไปของวิธี Newton ในกรณีที่ไม่ข้อจำกัดเพื่อใช้ในการแก้ (3.9)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad f(x) \\ &\text{Subject to} \quad g(x) = 0 \end{aligned} \tag{3.9}$$

(3.10) แสดงการประยุกต์ในวิธีนัวตันเพื่อให้มีความสอดคล้องกับเงื่อนไขของความเหมาะสมโดยสามารถเขียนสมการ Lagrangian ของการแก้ปัญหาใน (3.9)

$$L(x,\lambda) = f(x) - \lambda^T g(x) \tag{3.10}$$

และเงื่อนไข First-order optimality condition

$$\nabla L(x,\lambda) = 0 \tag{3.11}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของวิธีนิวตันได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} x_{k+1} \\ \lambda_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_k \\ \lambda_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_k \\ v_k \end{pmatrix} \tag{3.12}$$

ซึ่ง p_k และ v_k สามารถแก้สมการด้วยระบบเชิงเส้น

$$\nabla^2 L(x_k,\lambda_k)\begin{pmatrix} p_k \\ v_k \end{pmatrix} = -\nabla L(x_k,\lambda_k) \tag{3.13}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของระบบสมการเชิงเส้นดังนี้

$$\begin{pmatrix} \nabla^2_{xx} L(x_k, \lambda_k) & -\nabla g(x_k) \\ -\nabla g(x_k)^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_k \\ v_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla_x L(x_k, \lambda_k) \\ g(x_k) \end{pmatrix} \tag{3.14}$$

สามารถนำมาเขียนสมการเพื่อนำเสนอให้อยู่ใน First oder optimalily condition สำหรับปัญหาความเหมาะสมดัง (3.15)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad \frac{1}{2} p^T [\nabla^2_{xx} L(x_k, \lambda_k)] p + p^T [\nabla_x L(x_k, \lambda_k)] \\ &\text{Subject to} \quad \left[\nabla g(x_k)\right]^T p + g(x_k) = 0 \end{aligned} \tag{3.15}$$

โดยที่ v_k คือ เวคเตอร์ของ Lagrange multipliers

ในการแก้ปัญหาด้วยวิธี Quadratic program จะมีกระบวนวิธีในการให้ได้ค่าที่เป็นฟังก์ชันกำลังสองในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีความเหมาะสมที่สุดภายข้อจำกัดที่เป็นเชิงเส้นโดยฟังก์ชันที่เป็นกำลังสองนี้จะมีการประมาณมาจาก Taylor series ที่ Lagrangian จุด (x_k, λ_k) และข้อจำกัดจะประมาณความเป็นเชิงเส้นจาก $g(x_k, p) = 0$

ในการแก้ปัญหาของ Sequential quadratic programming ในกระบวนการทุกรอบของโปรแกรมกำลังสองสามารถแก้โดยให้มีความสอดคล้อง (p_k, v_k) โดยกระบวนการของการทำในรอบต่อๆ ไปจะอาศัยการ Update (x_k, λ_k) เพื่อทำกระบวนการทำซ้ำที่จุดใหม่

วิธีการนี้สามารถคำนวณการวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสมได้ง่าย แม้ในระบบมีข้อจำกัดแบบอสมการ เช่น เดียวกับวิธีโปรแกรมเชิงเส้น ส่วนความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบโดยทั่วไปสามารถลู่เข้าได้เร็ว อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับวิธีการหาทิศทางการปรับปรุงค่าสู่จุดคำตอบด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 การวิเคราะห์กำลังการไหล (Load flow) [22, 23]

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นเริ่มต้นจากการพิจารณาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น แผนภาพเส้นเดี่ยว (Single line diagram) ของระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้ข้อมูลที่เราให้ความสนใจเป็นอันดับแรกคือ ข้อมูลประจำสายส่งแต่ละเส้นซึ่งเราสามารถแทนวงจรต่อเฟสได้ด้วยวงจรแบบ π โดยข้อมูลที่ใช้ประกอบไปด้วยค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และแอดมิตแตนซ์อัดประจุ (Line-charging admittance) ค่าต่างๆเหล่านี้จำเป็นต้องใช้เพื่อคำนวณค่าสมาชิกต่างๆของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus admittance matrix) สำหรับระบบไฟฟ้าขนาด N บัสนั้น เราสามารถเขียนค่าสมาชิกเหล่านี้ในรูปทั่วไปได้ด้วย Y_{ij} ซึ่งกำหนดโดย

$$Y_{ij} = |Y_{ij}|\angle\delta_{ij} = |Y_{ij}|\cos(\delta_{ij}) + j|Y_{ij}|\sin(\delta_{ij}) \tag{3.16}$$

นอกจากนี้ข้อมูลที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ายังรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์, ค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, ค่าพิกัดของตัวเก็บประจุต่อขนาน (Shunt capacitor) และการตั้งค่าแท็ปของหม้อแปลง เป็นต้น

ทั้งนี้เราสามารถเริ่มขั้นตอนในการพิจารณาปัญหาได้โดยอาศัยพิกัดเชิงขั้วในการกำหนดค่าแรงดันที่บัส i ใดๆในระบบไฟฟ้าได้ดัง (3.17)

$$V_i = |V_i|\angle\theta_i = |V_i|\cos(\theta_i) + j|V_i|\sin(\theta_i) \tag{3.17}$$

กระแสไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ บัส i ในพจน์ของสมาชิกของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \ldots + Y_{iN}V_N = \sum_{k=1}^{N} Y_{ik}V_k \tag{3.18}$$

กำหนดให้ P_i และ Q_i แทนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟสุทธิที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ บัส i ซึ่งเราสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ว่า $P_i + jQ_i = V_i I_i^*$ ดังนั้นเมื่ออาศัย (3.17) และ (3.18) เราจะได้ค่าสังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าบัส i คือ

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^{N} Y_{ik}V_k \tag{3.19}$$

ซึ่งเราสามารถแทนค่าได้จาก (3.16) และ (3.17) เป็นดังนี้

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^{N} |Y_{ik} V_i V_k| \angle \delta_{ik} + \theta_k - \theta_i \tag{3.20}$$

เมื่อทำการกระจาย (3.20) และแยกสมการส่วนจริงและส่วนจินตภาพเราจะได้

$$P_i = \sum_{k=1}^{N} |V_i V_k Y_{ik}| \cos(\delta_{ik} + \theta_k - \theta_i) \tag{3.21}$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^{N} |V_i V_k Y_{ik}| \sin(\delta_{ik} + \theta_k - \theta_i) \tag{3.22}$$

(3.21) และ (3.22) คือสมการกำลังการไหล ซึ่งเป็นใช้หากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามลำดับ โดยที่สมการกำลังการไหลทั้งสองสมการนั้นมีลักษณะเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นต้องใช้วิธีการแก้สมการไม่เชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยของสมการ วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการสมการไม่เชิงเส้นโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ คือ วิธีการวิเคราะห์เชิงเลข (Numerical analysis method) ด้วยกระบวนการทำซ้ำ (Iterative method) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีของเกาส์ (Gauss method), วิธีของเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidei method) และวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เป็นต้น วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการหาผลเฉลยของสมการกำลังการไหลมากที่สุด คือ วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากมีข้อดี คือ มีคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบที่รวดเร็วแบบกำลังสอง (Quadratic convergence) ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมดน้อยกว่าวิธีอื่น และจำนวนรอบของการคำนวณซ้ำไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสันในการผลเฉลยของสมการกำลังการไหล

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เราจะจำแนกบัสออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

บัสอ้างอิง (Slack Bus)

บัสอ้างอิงเป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่บัสหนึ่งในระบบ ซึ่งทำหน้าที่ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟสูญเสียที่เกิดขึ้น เพื่อให้ระบบเกิดความสมดุลของกำลังไฟฟ้า ณ บัสอ้างอิงนี้เราจะทำการกำหนดขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า โดยที่ยังไม่สามารถระบุค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟได้

บัสควบคุมแรงดัน (PV Bus)

บัสทุกบัสในระบบที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นบัสควบคุมแรงดันยกเว้นบัสอ้างอิง โดยบัสควบคุมแรงดันเป็นบัสที่เราสามารถกำหนดค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าแอกทีฟและค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะมีลักษณะเป็นตัวแปรอิสระและมุมของแรงดันไฟฟ้าจะเป็นตัวแปรสถานะ (State variable) ของบัส

โหลดบัส (PQ Bus)

โหลดบัสเป็นบัสในระบบที่ไม่ต่อเชื่อมอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โหลดบัสเราจะทราบค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ ส่วนค่าขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าในบัสนี้จะเป็นตัวแปรสถานะ (State variable) ของระบบ

(3.21) และ (3.22) เรียกว่าสมการกำลังการไหลซึ่งเป็นมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นการวิเคราะห์กำลังการไหลโดยการใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันจะเปลี่ยนสมการกำลังการไหลให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นโดยการใช้การกระจายของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) การกระจายฟังก์ชันของ P และ Q รอบจุดประมาณเริ่มต้นและไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความคาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเป็นเมตริกซ์ ดังสมการที่ (3.23)

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V}\\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \frac{|\Delta V|}{V}\end{bmatrix} \tag{3.23}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \cdots\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}J_1 & \vdots & J_2\\ \cdots & & \cdots\\ J_3 & \vdots & J_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta J\\ \cdots\\ \frac{|\Delta V|}{V}\end{bmatrix}$$

โดยที่ $\Delta P, \Delta Q$ คือ เวคเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟแต่ละบัส

$\Delta\delta$ คือ เวคเตอร์ของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข

$\Delta|V|$ คือ เวคเตอร์ของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข

J_1, J_2, J_3, J_4 คือ เมตริกซ์ จาโคเบียนย่อย (Sub jacobian matrix)

แต่ละสมาชิกของ ΔP และ ΔQ สามารถคำนวณได้จาก (3.24)

$$\begin{aligned}\Delta P_i &= (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \\ \Delta Q_i &= (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc}\end{aligned} \tag{3.24}$$

โดยที่ ΔP_i คือ สมาชิกตัวที่ i ของเวคเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังจริง

ΔQ_i คือ สมาชิกตัวที่ i ของเวคเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังรีแอคทีฟ

P_{gi} คือ ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้จากบัส i

P_{di} คือ ค่าความต้องการกำลังจริงของบัส i

Q_{gi} คือ ค่ากำลังรีแอคทีฟที่ผลิตได้จากบัส i

Q_{di} คือ ค่าความต้องการกำลังรีแอคทีฟของบัส i

$P_{i,calc}$ คือ ค่ากำลังจริงที่คำนวณได้จาก (3.10) สำหรับบัส i

$Q_{i,calc}$ คือ ค่ากำลังรีแอคทีฟที่คำนวณได้จาก (3.10) สำหรับบัส i

และสำหรับสมาชิกแต่ละสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_1, J_2, J_3, J_4 สามารถหาได้ดัง (3.25)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} &= -\left|V_i V_j Y_{ij}\right| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \\
\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= -Q_i - \left|V_i\right|^2 B_{ij} \\
\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} &= -\left|V_i V_j Y_{ij}\right| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \\
\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= P_i - \left|V_i\right|^2 G_{ij} \\
\left|V_j\right| \frac{\partial P_i}{\left|\partial V_j\right|} &= \left|V_j\right| \left|V_i Y_{ij}\right| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \\
\left|V_i\right| \frac{\partial P_i}{\left|\partial V_i\right|} &= P_i + \left|V_i\right|^2 G_{ij} \\
\left|V_j\right| \frac{\partial Q_i}{\left|\partial V_j\right|} &= -\left|V_j\right| \left|V_i Y_{ij}\right| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \\
\left|V_i\right| \frac{\partial Q_i}{\left|\partial V_i\right|} &= Q_i - \left|V_i\right|^2 B_{ij}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยค่าของ G_{ij} และ B_{ij} เป็นไปตาม (3.26)

$$Y_{ij} = \left|Y_{ij}\right| \angle \theta_{ij} = \left|Y_{ij}\right| \cos\theta_{ij} + j\left|Y_{ij}\right| \sin\theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \tag{3.26}$$

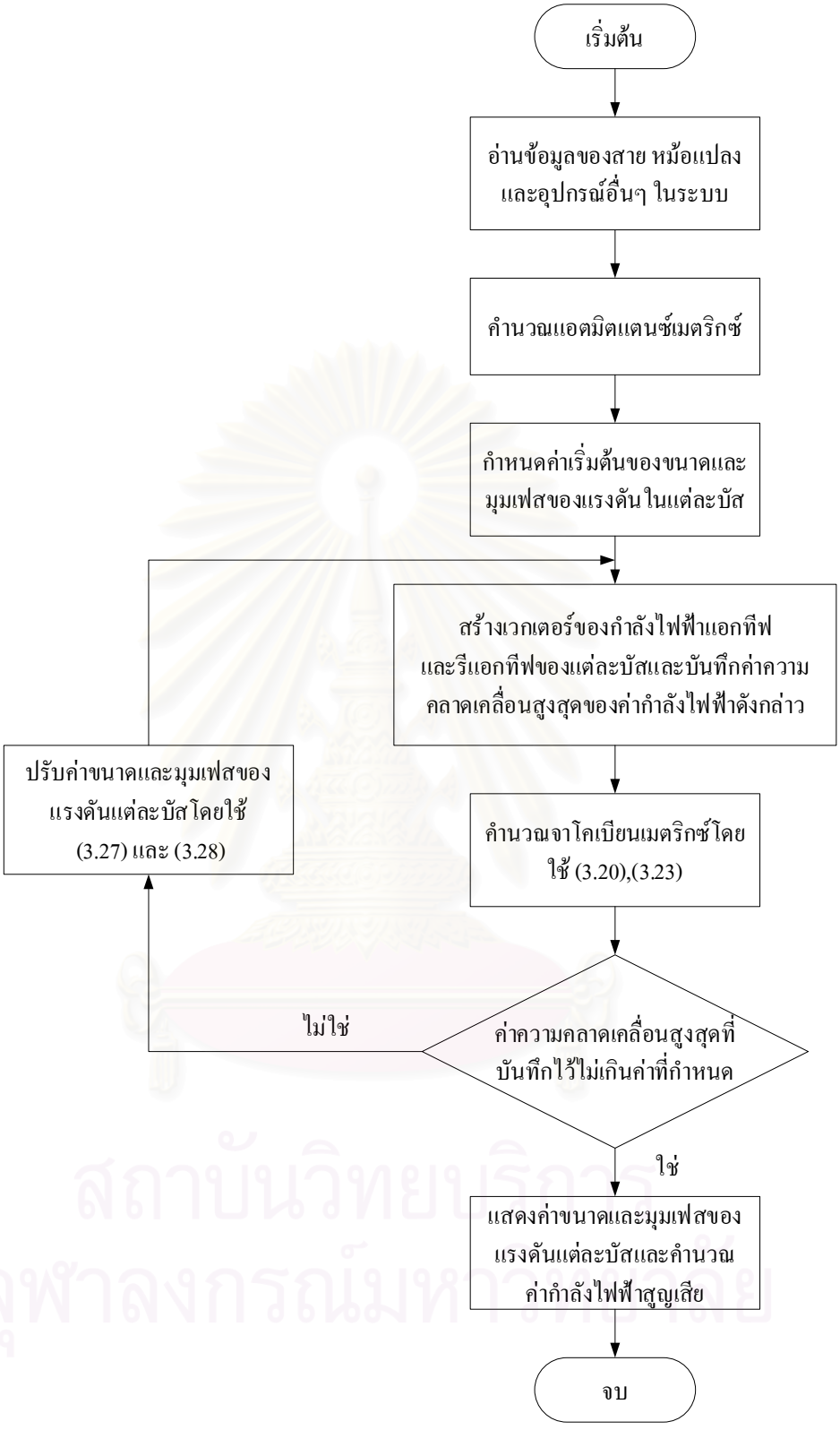
การคำนวณกำลังการไหลด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันนั้นจำเป็นต้องทำการคำนวณ (3.23) ซึ่งเพื่อหาค่าที่จะนำไปปรับเปลี่ยนค่ามุมกับขนาดแรงดันที่แต่ละบัสได้แก่ $\Delta\delta$ และ $\frac{\Delta|V|}{V}$ จากนั้นจึงนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณในรอบถัดไป จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่ทุกบัสในระบบน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งจึงหยุดคำนวณ
สำหรับการปรับแต่งในแต่ละรอบการคำนวณจะกำหนดโดย

$$\Delta\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + \Delta\theta^{(k)} \tag{3.27}$$

$$\Delta V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta V^{(k)} \tag{3.28}$$

เราสามารถสรุปขั้นตอนการแก้สมการกำลังการไหล แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณกำลังการไหลด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 การวิเคราะห์กำลังการไหลที่เหมาะสม (Optimal power flow) [23]

รูปแบบของปัญหาที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเขียนได้ดัง (3.29) ถึง (3.32) โดย (3.30) คือสมการสมดุลของกำลังไฟฟ้า (Power balance equation)

$$Min\sum_{g=1}^{Ng} C_g(P_g) \tag{3.29}$$

$$\sum_{d=1}^{Nd} Pd + P_l - \sum_{g=1}^{Ng} P_g = 0 \tag{3.30}$$

$$\left|P_t\right| \le P_{t,\lim it} \tag{3.31}$$

$$P_{g,\min} \le P_g \le P_{g,\max} \tag{3.32}$$

โดยที่

N_g	คือ จำนวนผู้จ่ายไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)
$C_g(P_g)$	คือ ราคาไฟฟ้าของผู้จ่ายไฟฟ้า g เมื่อจ่ายไฟฟ้าปริมาณ P_g
P_d	คือ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าในบัส d
Nd	คือ จำนวนบัสของผู้ใช้ไฟฟ้า (โหลด)
P_l	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียทั้งหมดในระบบ
P_g	คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า g ผลิต
$P_{g,\min}$	คือ พิกัดล่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g
$P_{g,\max}$	คือ พิกัดบนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g
P_t	คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง t
$P_{t,\lim,it}$	คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง t

ปัญหาการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสมใน (3.29) ถึง (3.32) สามารถแก้ได้โดยวิธีการคำนวณดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.6 ซึ่งอนุพันธ์ของพจน์ $\partial P_l / \partial P_g$ และ $\partial P_t / \partial P_g$ สามารถคำนวณได้โดยวิธีการที่พัฒนาจาก [22] โดยอาศัยการวิเคราะห์ เอ.ซี. นิวตัน-ราฟสันกับ เทคนิคการหาอนุพันธ์แยกส่วนและเทคนิคกฎลูกโซ่ดังแสดงต่อไปนี้

3.6.1 การคำนวณการความไวของกำลังสูญเสียในระบบ

การคำนวณค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบโดยวิธีนี้ระบบโดยวิธีจะใช้สมมติฐานว่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบได้รับการชดเชยจากบัสต่างๆ ในระบบ ดังนั้นสามารถเขียนสมการแสดงการจ่ายกำลังไฟฟ้าของบัสต่างๆ ที่สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้ดังนี้

$$Pl = \left(P_1 - P_{1,load}\right) + \left(P_2 - P_{2,load}\right) + \ldots + \left(P_i - P_{i,load}\right) + \ldots + \left(P_N - P_{N,load}\right) \tag{3.33}$$

โดยที่

P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

$P_{i,load}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ร่วมจ่ายให้โหลดในระบบโดยบัส i

P_l คือ กำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดที่สูญเสียในระบบ

(3.33) สามารถเขียนได้ในรูปของกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและปริมาณโหลด ณ แต่ละบัสได้เป็น

$$\sum_{ig=1}^{Ng} P_{ig} + \sum_{it=1}^{Ni} P_{it} = P_L \tag{3.34}$$

โดยที่

P_{ig} คือ ปริมาณการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i_g

P_{it} คือ ปริมาณโหลดจากโหลดที่ i_g

N_g คือ จำนวณเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

N_l คือ จำนวณโหลดทั้งหมดในระบบ

สมการดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า (Power balance equation) และสามารถแทนผลรวมกำลังการผลิตและปริมาณโหลดด้านซ้ายของสมการด้วยสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow equation) ของทุกบัสในระบบ ดังนี้

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\left|V_i\right|\left|V_j\right|Y_{ij}[\cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] = P_L \tag{3.35}$$

เช่นเดียวกับการคำนวณโดยวิธีพิจารณาว่ากำลังสูญเสียในระบบได้รับการชดเชยจากบัสอ้างอิง โดยการใช้ทฤษฎีอนุพันธ์แยกส่วน (Partial differentiation) และกฎลูกโซ่ (Chain rule) จะได้

$$\frac{\partial P_L}{\partial \delta_m} = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial P_L}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} + \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \right] \tag{3.36}$$

และ

$$\frac{\partial P_L}{\partial |V_m|} = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial P_L}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} + \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \right] \tag{3.37}$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_L}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

โดยที่ $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m}, \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|}, \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}, \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}$ คือ สมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน ดังนั้น (3.38) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_L}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \left[J^T \right] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

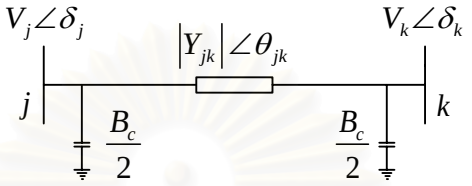
ดังนั้นค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \left[J^T \right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_L}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

โดย P_L ในสมการด้านขวาคือ (3.40)

3.6.2 การคำนวณความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง

การคำนวณความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ โดยการพิจารณาสายส่งซึ่งต่ออยู่ที่บัส j และ k ดังแสดงในรูปที่ 3.9 สมการของกำลังปรากฏที่ไหลในสายส่งแสดงดัง (3.41)



รูปที่ 3.9 แบบจำลองสายส่ง

$$S_{jk} = |V_j|^2 |Y_{jk}|\angle -\theta_{jk} - |V_j||V_k||Y_{jk}|\angle\delta_j - \delta_k - \theta_{jk} + j\frac{B_c}{2}|V_j|^2 \qquad (3.41)$$

จะได้ส่วนจริงใน (3.41) เป็นดังนี้

$$P_{jk} = |V_j|^2 |Y_{jk}|\cos(\theta_{jk}) - |V_j||V_k||Y_{jk}|\cos(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) \qquad (3.42)$$

โดยที่

S_{jk}	คือ	กำลังปรากฏที่ไหลในสายส่ง j-k
P_{jk}	คือ	กำลังจริงที่ไหลในสายส่ง j-k
$\|V_j\|,\|V_k\|$	คือ	ขนาดแรงดันที่บัส j และ k ตามลำดับ
$\|\delta_j\|,\|\delta_k\|$	คือ	มุมของแรงดันที่บัส j และ k ตามลำดับ
$Y_{jk}\angle\theta_{jk}$	คือ	ค่าแอตมิตแตนซ์ของสายส่ง
B_c	คือ	ค่าซัสเซพแตนซ์ของตัวอัดประจุของสายส่ง

เช่นเดียวกับการคำนวณความไวของกำลังสูญเสียในระบบ สามารถคำนวณความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ ได้ดังนี้

โดยการใช้ทฤษฎีอนุพันธ์แยกส่วนและกฎลูกโซ่ จะได้

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i}\cdot\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i}\cdot\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}\right] \tag{3.43}$$

และ

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i}\cdot\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i}\cdot\frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}\right] \tag{3.44}$$

โดยที่

N คือ จำนวนบัสในระบบไฟฟ้า

P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่ฉีดเข้าบัส i

Q_i คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิที่ฉีดเข้าบัส i

δ_m คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส m

$|V_m|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส m

ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

โดยที่ $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m}, \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|}, \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}, \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}$ คือ สมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน ดังนั้น (3.45)

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \left[J^T\right] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

ดังนั้นค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ คือ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \left[J^T \right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

โดยที่

$\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i}$ คือ ค่าความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง j-k เทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่จ่ายเข้าบัส i

$\frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i}$ คือ ค่าความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง j-k เทียบกับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิที่จ่ายเข้าบัส i

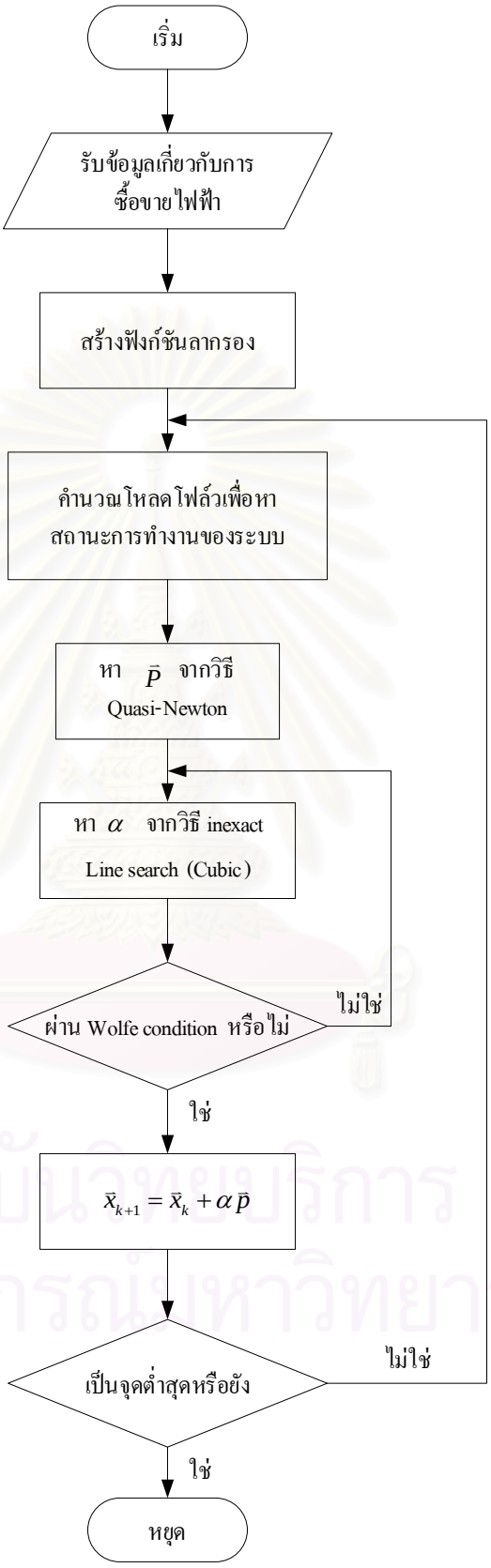
(3.47) สามารถหาคำตอบได้โดยการแทนค่าอินเวอร์สของเมตริกซ์จาโคเบียนและค่าการหาอนุพันธ์แยกส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเทียบกับมุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าการหาอนุพันธ์แยกส่วนดังกล่าวสามารถคำนวณได้จาก (3.42) ดังแสดง

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} = \begin{Bmatrix} 0 & for\ m \neq j\ and\ k \\ |V_j||V_k||Y_{jk}|[\sin(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk})] & for\ m = j \\ -|V_j||V_k||Y_{jk}|[\sin(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk})] & for\ m = k \end{Bmatrix} \tag{3.48}$$

และ

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} = \begin{Bmatrix} 0 & for\ m \neq j\ and\ k \\ 2|V_j||y_{jk}|\cos(\theta_{jk}) - |V_j||Y_{jk}|\cos(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) & for\ m = j \\ -|V_j||Y_{jk}|\cos(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) & for\ m = k \end{Bmatrix} \tag{3.49}$$

ขั้นตอนการคำนวณสามารถแสดงได้รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการคำนวณกำลังการไหลที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะสนในเฉพาะการจัดสรรกำลังการผลิตด้วยวิธีกำลังการไหลที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้เป็นกลไกลในการจัดสรรกำลังการผลิตและจัดสรรการเปลี่ยนแปลงของระบบในกรณีที่เกิดความคับคั่งขึ้นในระบบของศูนย์ควบคุมระบบ เนื่องจากวิธีกำลังการไหลที่เหมาะสมสามารถให้คำตอบที่เป็นค่าเหมาะสมที่สุดในระบบ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันยังมีปัญหาเกี่ยวกับระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณกับระบบขนาดใหญ่แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วจึงคาดว่าในอนาคตอันใกล้คอมพิวเตอร์จะสามารถคำนวณระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

แบบจำลองการจัดการความคับคั่งของสายส่ง

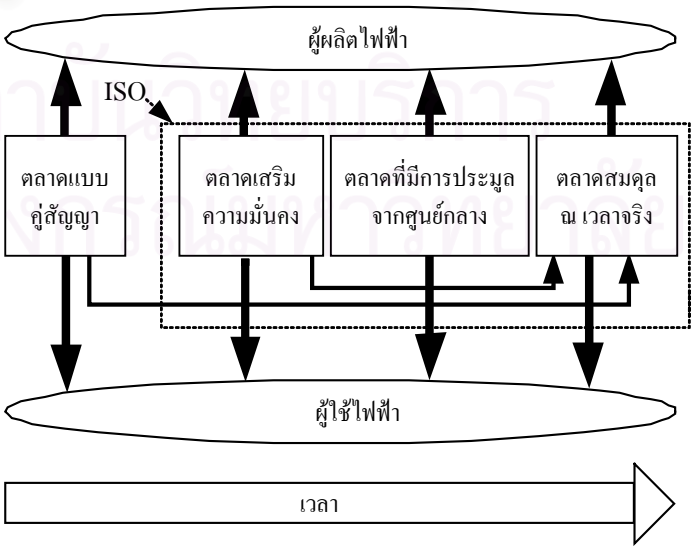
การศึกษาการจัดการความคับคั่งของสายส่งในหลายๆ ตลาดทั่วโลกมีความแตกต่างและความซับซ้อนตามกฎเกณฑ์ของแต่ละตลาดและนโยบายภาครัฐของแต่ละประเทศ เพื่อให้การจัดสรรกำลังไฟฟ้าเกิดประโยชน์สูงสุดและสามารถปฏิบัติงานได้ปกติภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ดังนั้นการศึกษาเพื่อที่จะนำผลไปวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่เหมาะสมและใกล้เคียงความจริงเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ถูกต้อง

4.1 แนวทางในการนำเสนอแบบจำลองและกระบวนวิธีในการแก้ปัญหา

4.1.1 โครงสร้างแบบจำลองการจัดการความคับคั่งในสายส่ง [5, 12, 29]

ในวิทยานิพนธ์นำเสนอโครงสร้างของตลาดเพื่อทำการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วนที่มีลักษณะการทำงานแตกต่างกันประกอบด้วย

1. ตลาดคู่สัญญา (Bilateral market)
2. ตลาดกลางไฟฟ้า (Power pool market)
3. ตลาดบริการเสริมความมั่นคงในระบบไฟฟ้า (Ancillary services market)
4. ตลาดสมดุล (Balancing market)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของการจัดการความคับคั่งในสายส่ง ณ.เวลาจริง

ตลาดคู่สัญญา (Bilateral market)

ตลาดคู่สัญญามีโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าที่การซื้อขายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการทำสัญญาระหว่างผู้ผลิตและผู้จำหน่ายไฟฟ้าโดยศูนย์ควบคุมจะไม่เข้าไปเกี่ยวข้องหากแต่จะทำหน้าที่เพียงการรักษาเสถียรภาพของระบบเท่านั้นซึ่งเป็นการกระตุ้นให้เกิดการแข่งขันเนื่องจากลูกค้าเป็นฝ่ายเลือกผู้ผลิตที่มีราคาต่ำสุดและเหมาะสมเองโดยการพิจารณาแบบจำลองประกอบด้วย 2 ประเด็นคือ

1. เรื่องข้อจำกัดต่างๆ ของสายส่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้าภายใต้ความจุของสายส่ง
2. เรื่องกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

โดยการพิจารณาประเด็นทั้ง 2 เพื่อนำมาจัดสรรสำหรับเสริมความมั่นคงของระบบภายใต้ข้อกำกัดต่างๆ ของสายส่ง

ตลาดกลางไฟฟ้า (Power pool market)

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางซื้อขายไฟฟ้าระหว่างผู้ผลิตและผู้ค้าปลีกและมีศูนย์ควบคุมอิสระควบคุมดูแลการซื้อขายและจัดสรรกำลังการผลิตของโรงผลิตไฟฟ้าต่างๆ ทั้งนี้ราคาไฟฟ้าที่ผู้ผลิตและผู้ซื้อแต่ละรายเสนอราคาเข้าสู่ตลาดกลางจะนำมาใช้ในการตัดสินใจเพื่อกำหนดราคาค่าไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามราคาหน่วยสุดท้าย (Marginal clearing price)

ตลาดกลางมีหน้าที่ 2 ประการ

1. เป็นศูนย์กลางการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างผู้ผลิตกับผู้ค้าปลีก
2. เป็นกลไกในการบริหารพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า เช่น การสั่งเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเพื่อสั่งเดินเครื่องจากโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อน

เนื่องจากไฟฟ้ามีลักษณะที่ไม่เหมือนสินค้าโดยปกติจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดกติกาในการซื้อขายในตลาดกลางเพื่อให้มีลักษณะคล้ายกับการซื้อขายสินค้าทั่วไปมากที่สุด กติกาดังกล่าวจะครอบคลุมถึงวิธีการยื่นเสนอราคาขายโดยผู้ผลิตและการกำหนดราคาเพื่อให้มีการผลิตเพียงพอตอบสนองความต้องการ โดยราคาอาจเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมงหรือทุกวันตามกติกาที่กำหนดขึ้น โรงไฟฟ้าที่เสนอราคาต่ำสุดจะได้รับการคัดเลือกให้เดินเครื่องและจ่ายไฟฟ้าโดยศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า (System operator) โดยศูนย์ควบคุมฯ จะเลือกโรงไฟฟ้าที่มีราคาถูกที่สุดก่อนและตามมาด้วยโรงไฟฟ้าที่มีราคาสูงขึ้นตามลำดับจนถึงจุดที่มีการผลิตเพียงพอตอบสนองความต้องการในแต่ละช่วงเวลาในตลาดกลาง โดยทั่วไปราคาของโรงไฟฟ้าโรงที่แพงที่สุดที่ได้รับคำสั่งให้เดินเครื่องคืออัตราค่าไฟฟ้าในช่วงเวลานั้น

ตลาดบริการเสริมความมั่นคงในระบบไฟฟ้า (Ancillary services market)

ตลาดบริการเสริมความมั่นคงในระบบไฟฟ้ามีโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าเพื่อบริการเสริมความมั่นคงในระบบไฟฟ้า (Ancillary services) เช่น การควบคุมการจัดสรรกำลังให้ระบบและการบริการให้ระบบมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ต้องการด้วยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เป็นต้น

ตลาดสมดุล (Balancing market)

ตลาดสมดุลจะบริการให้ระบบไฟฟ้ามีความสมดุลโดยมีโครงสร้างการซื้อขายไฟฟ้าเพื่อบริการให้ระบบมีความสมดุล (Balancing mechanism) ในช่วงเวลาทำงานจริงของตลาด เช่น การจัดสรรปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตหรือโหลดเพื่อให้ระบบทำงานได้ในช่วงเวลาทำงานจริงเมื่อเกิดมีข้อจำกัดต่างๆ ที่เกิดกับระบบ เป็นต้น

สำหรับการจัดการความคับคั่งของสายส่งในหลายๆ ตลาดทั่วโลกมีความแตกต่างและความซับซ้อนขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ของแต่ละตลาดและนโยบายของภาครัฐของแต่ละประเทศเพื่อให้การจัดสรรกำลังไฟฟ้าเกิดประโยชน์สูงสุดและมีความสามารถปฏิบัติงานได้อย่างปกติภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ การศึกษาเรื่องการจัดการความคับคั่งจึงมีความจำเป็นเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ถูกต้องและเหมาะสมและในวิทยานิพนธ์นี้มีการนำเสนอโครงสร้างของแบบจำลองการจัดการความคับคั่งของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 4.1 ภายใต้โครงสร้างนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกระบวนการของตลาดตามลำดับต่อไปนี้

ตลาดคู่สัญญาจะมีการตกลงซื้อขายไฟฟ้าระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้าและผู้ผลิตไฟฟ้าตามความพอใจโดยสามารถขอคำแนะนำจากศูนย์ควบคุมอิสระ ในส่วนของตลาดกลางไฟฟ้าจะมีการเสนอราคาและปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการจากผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าตามลำดับ เพื่อนำมาจัดสรรกำลังการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ของสายส่งและยังมีตลาด ณ ช่วงเวลาจริงเข้ามาช่วยเหลือในกรณีที่ปริมาณไฟฟ้าในตลาดล่วงหน้าไม่เพียงพอ

โดยที่ในช่วงเวลาทำการจริงศูนย์ควบคุมอิสระจะทำหน้าที่ในการจัดสรรกำลังการผลิตให้เกิดความสมดุลของตลาดระหว่างผู้ใช้และผู้ผลิตไฟฟ้า ในกรณีที่เกิดความไม่สมดุลตลาดคู่สัญญา ตลาดกลางและตลาด ณ ช่วงเวลาจริงจะช่วยทำหน้าที่รักษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้าขณะที่ตลาดกำลังดำเนินการ โดยตลาดในช่วงนี้จะมีการพิจารณาความคับคั่งในสายส่ง โดยที่ในกรณีที่สายส่งมีความจุเกินหรือใกล้ความเพียงพอที่รับได้และมีการบรรเทาปัญหาด้วยการปรับเปลี่ยนการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการปรับโหลดเพื่อให้เกิดประสิทธิผลและเกิดความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นิยามเวลาทำการจริง (Real time) เป็นคาบเวลาหนึ่งสั้นๆ เช่น 5-15 นาทีก่อนเวลาจริง ดังนั้นจึงมีเวลาพอที่จะทำการจำลองเหตุการณ์ในปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมากจนเกิน

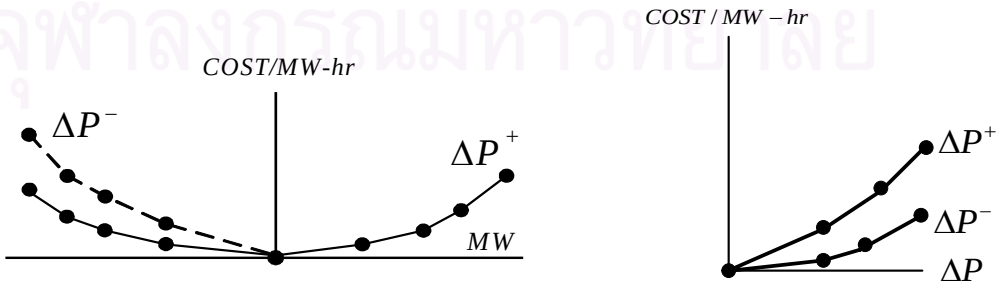
ไปได้ เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาทำการจริงจะเป็นการเพียงเติมเต็มกำลังส่วนต่างๆ เพื่อให้ระบบมีความสมดุลซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการจัดการความคับคั่งแบบปรับเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการดำเนินการหากเงื่อนไขไม่ซับซ้อนจนเกินไป แต่อย่างไรก็ตามต้องยอมรับว่าบางครั้งอาจเกิดปัญหาต่อการจำลองเหตุการณ์ คือ กรณีที่โหลดเพิ่มขึ้นถึง 500-600 MW ในช่วงเวลาเพียง 5 นาที ซึ่งกรณีนี้จำเป็นต้องดำเนินขั้นตอนการควบคุมโดยอาศัยข้อมูลสภาพล่าสุดเท่าที่จะปฏิบัติได้จริง

การนำเสนอมีการจัดการความคับคั่งในสายส่ง ณ ช่วงเวลาจริงภายใต้ตลาดที่มีการแข่งขันซึ่งมีการจัดสรรโดยศูนย์ควบคุมอิสระเพื่อแก้ปัญหาเมื่อมีเหตุการณ์ความคับคั่งในสายส่ง โดยผู้ผลิตไฟฟ้าและโหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานส่งต้นทุนราคาส่วนเพิ่มพลังงาน (Incremental energy bid) และต้นทุนราคาส่วนลดพลังงาน (Decremental energy bid) ให้กับศูนย์ควบคุมอิสระเพื่อที่จะทำการเลือกและจัดสรรให้การเปลี่ยนแปลงเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

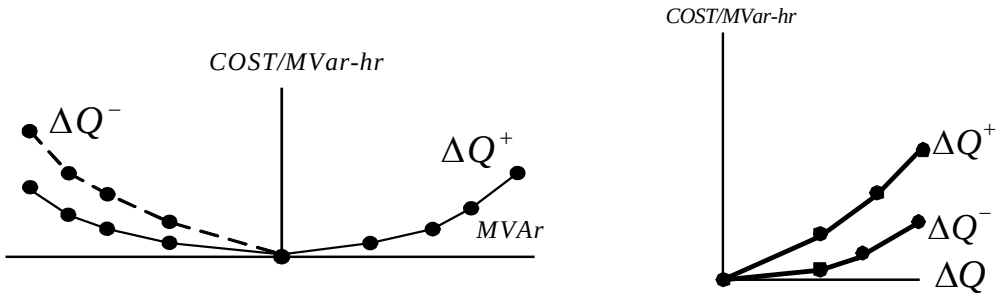
ในทางปฏิบัติบางกรณีที่เกิดปัญหาความคับคั่งไม่สามารถใช้การปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องอาศัยอัตราส่วนของตลาดที่ประกอบด้วยคู่สัญญาที่จะมีการส่งส่วนของราคาที่ต้องการชดเชยที่ทั้งคู่สามารถยอมรับได้เมื่อเกิดปัญหาความคับคั่งขึ้น โดยข้อมูลเหล่านี้จะมีการจัดการด้วยศูนย์ควบคุมอิสระเพื่อที่ทำการลดกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความคับคั่ง แต่อย่างไรก็ตามในกรณีเกิดความคับคั่งแล้วตลาดสมดุลไม่สามารถจัดการความคับคั่งได้จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากส่วนอื่นๆ เพื่อช่วยแก้ไขปัญหา เช่น การลดโหลด

4.1.2 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงราคา (Adjust bid prices) [2, 5]

แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงราคาจะประกอบด้วยราคาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าที่โหลด และราคาของการสูญเสียซึ่งแบบจำลองนี้จะนำเสนอทั้งตลาดคู่สัญญาและตลาดกลางโดยมีแบบจำลองของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้ [2]



รูปที่ 4.2 ราคาที่พอใจจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

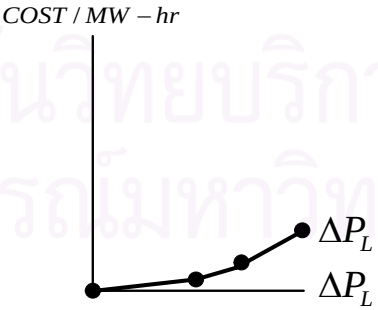


รูปที่ 4.3 ราคาที่พอใจจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยทั่วไปโหลดจะแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. โหลดที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (Non dispatchable load) เป็นโหลดกลุ่มใหญ่ที่มีความสำคัญส่วนมากจะเป็นโหลดของสถานที่สำคัญโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ
2. โหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (Dispatchable load) เป็นความต้องการไฟฟ้าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ซึ่งจะใช้ในการแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่งตามคำสั่งผู้ดูแลระบบ

การจัดการความคับคั่งในสายส่งจะอาศัยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตเพื่อบรรเทาปัญหา แต่บางครั้งไม่สามารถแก้ปัญหาได้จำเป็นต้องอาศัยการจัดการโดยขอความร่วมมือจากผู้ใช้ไฟฟ้าในการลดโหลดเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาความคับคั่ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้มีการจำลองราคาที่เกิดจากความพอใจจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ราคาที่พอใจจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงของโหลด

ผู้ใช้และผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องเสนอราคาที่พอใจในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อลดปัญหาความคับคั่งให้กับศูนย์ควบคุมอิสระเพื่อนำไปพิจารณาจัดสรรให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

4.1.3 การจำลองการสูญเสียในสายส่ง [11]

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของวิทยานิพนธ์จะพิจารณาเฉพาะค่ากำลังสูญเสียของกำลังไฟฟ้าจริง เนื่องจากในทางปฏิบัติกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานของสายตัวนำ, หม้อแปลงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเพิ่มสูงขึ้นและสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์

ดังนั้นการพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นเรื่องสำคัญเพราะกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้จะทำให้ความสามารถรับพลังงานของสายลดลง เพื่อที่จะหาทางลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอเพื่อสะท้อนกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้อยู่ในรูปแบบของราคาการสูญเสียเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของการสูญเสียรวมในระบบ ซึ่งทำให้ผู้จัดการสายส่งสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบสายส่งได้ส่งผลให้ระบบสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นและนอกจากนี้ยังมีตัวคูณเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการถ่วงน้ำหนักระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตและการเปลี่ยนแปลงโหลดเพื่อแก้ไขปัญหาความคับคั่งโดยราคาการสูญเสียในส่วนนี้จะเป็นเพียงราคาเทียมเพื่อใช้สะท้อนให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง

ใน [11] ได้กำหนดกำลังสูญเสียของกำลังไฟฟ้าจริงที่สายส่ง ดังนี้

$$Ploss = 0.5\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}(G_{ij}[V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j)]) \qquad (4.1)$$

โดยที่ $Ploss$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง

V คือ แรงดันไฟฟ้า

δ คือ มุมกำลังไฟฟ้า

G คือ ความนำของสายส่ง

(4.1) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งโดยสามารถกำหนดให้เป็นราคาการสูญเสียได้โดยนำเอาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียคูณกับค่าต้นทุนของการสูญเสีย (C_L : \$/MW-hr) ที่กำหนดด้วยเจ้าของระบบและในวิทยานิพนธ์จะนำเสนอค่า k เพื่อเป็นตัวคูณที่ใช้ให้น้ำหนักความสำคัญซึ่งสามารถทำให้เจ้าของสายส่งสามารถปรับน้ำหนักหรือความสำคัญระหว่างการพยายามปรับเปลี่ยนกำลังผลิตของผู้ผลิตไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบสายส่งได้

4.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและการปรับเปลี่ยนโหลด [5, 12, 13]

วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการหาความเหมาะสม (Optimization) นำมาใช้แก้ปัญหาที่เรียกว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ราคาต่ำสุดโดยราคาที่เราสนใจ คือ ราคาการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของโหลดและราคาการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Minimize: \sum_{i=1}^{ng}[C_{pi}(\Delta P_{gi}) + C_{qi}(\Delta Q_{gi})] + \sum_{i=1}^{nL} C_{load}(\Delta P_{Li}) + kC_L(Ploss) \quad (4.2)$$

ข้อจำกัดที่ต้องเป็นตามเงื่อนไขสมดุล (Equality constraint) ได้แก่

สมดุลกำลังไฟฟ้าจริง

$$P_{gi}^0 + \Delta P_{gi} - \sum_{j=1}^{n} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) - P_{Li} - \Delta P_{Li} = 0 \quad (4.3)$$

สมดุลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

$$Q_{gi}^0 + \Delta Q_{gi} + \sum_{j=1}^{n} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) - Q_{Li} = 0 \quad (4.4)$$

ข้อจำกัดภายใต้ขอบเขตที่กำหนด (Inequality constraint) ได้แก่

ข้อจำกัดของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าของสายส่ง

$$S_i^{\min} \le S_i^0 + \Delta S \le S_i^{\max} \quad (4.5)$$

ข้อจำกัดทางแรงดัน

$$V_i^{\min} \le V_i^0 + \Delta V_i \le V_i^{\max} \quad (4.6)$$

ข้อจำกัดในการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{gi}^{\min} \le P_{gi}^{0} + \Delta P_{gi} \le P_{gi}^{\max} \tag{4.7}$$

ข้อจำกัดในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$Q_{gi}^{\min} \le Q_{gi}^{0} + \Delta Q_{gi} \le Q_{gi}^{\max} \tag{4.8}$$

ข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากโหลด

$$P_{Li}^{\min} \le P_{Li}^{0} + \Delta P_{Li} \le P_{Li}^{\max} \tag{4.9}$$

โดยที่

$C_{pi}(\Delta P_{gi})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$C_{qi}(\Delta Q_{gi})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$C_{Load}(\Delta P_{Li})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากโหลด

$C_L(Ploss)$ คือ ราคากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่ง

Q_{gi} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Q_{Li} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลด

P_{Li} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด

S_i คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่ง

V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

k คือ ตัวปรับน้ำหนักเพื่อเน้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

Y_{ij} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง

ng คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

n คือ จำนวนบัสในระบบไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและการปรับเปลี่ยนโหลดและการช่วยเหลือของคู่สัญญา [5, 12, 13]

วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการนำเสนอนี้เพื่อพิจารณาให้ราคาต่ำสุดโดยราคาที่เราสนใจคือ ราคาการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของโหลดและราคาการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Minimize: \sum_{i=1}^{ng}[C_{pi}(\Delta P_{gi}) + C_{qi}(\Delta Q_{gi})] + \sum_{i=1}^{nL} C_{load}(\Delta P_{Li}) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{\substack{j=1,\\ j\neq i}}^{n}[C_{Pb}(\Delta P_{gi}^{ij}) + C_{Lb}(\Delta P_{Li}^{ij})] + kC_{Loss}(Ploss) \quad (4.10)$$

ข้อจำกัดที่ต้องเป็นตามเงื่อนไขสมดุล (Equality constraint) ได้แก่
สมดุลกำลังไฟฟ้าจริง

$$P_{gi}^{0} + \Delta P_{gi} - \Delta P_{gi}^{ij} - \sum_{j=1}^{n} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) - P_{Li}^{0} - \Delta P_{Li} - \Delta P_{Li}^{ij} = 0 \quad (4.11)$$

สมดุลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

$$Q_{gi}^{0} + \Delta Q_{gi} + \sum_{j=1}^{n} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) - Q_{Li} = 0 \quad (4.12)$$

ข้อจำกัดภายใต้ขอบเขตที่กำหนด (Inequality constraint) ได้แก่
ข้อจำกัดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของสายส่ง

$$S_i^{\min} \le S_i^{0} + \Delta S \le S_i^{\max} \quad (4.13)$$

ข้อจำกัดทางแรงดัน

$$V_i^{\min} \le V_i^{0} + \Delta V_i \le V_i^{\max} \quad (4.14)$$

ข้อจำกัดในการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{gi}^{\min} \le P_{gi}^{0} + \Delta P_{gi} + \Delta P_{gi}^{ij} \le P_{gi}^{\max} \tag{4.15}$$

ข้อจำกัดในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$Q_{gi}^{\min} \le Q_{gi}^{0} + \Delta Q_{gi} \le Q_{gi}^{\max} \tag{4.16}$$

ข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากโหลด

$$P_{Li}^{\min} \le P_{Li}^{0} + \Delta P_{Li} + \Delta P_{Li}^{ij} \le P_{Li}^{\max} \tag{4.17}$$

โดยที่

$C_{pi}(\Delta P_{gi})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$C_{pb}(\Delta P_{gi}^{ij})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคู่สัญญา

$C_{qi}(\Delta Q_{gi})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$C_{Load}(\Delta P_{Li})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากโหลด

$C_{Lb}(\Delta P_{Li}^{ij})$ คือ ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากโหลดแบบคู่สัญญา

$C_{L}(Ploss)$ คือ ราคากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่ง

Q_{gi} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Q_{Li} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลด

P_{Li} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด

S_i คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่ง

V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

k คือ ตัวปรับน้ำหนักเพื่อเน้นกำลังสูญเสียในสายส่ง

Y_{ij} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง

ng คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

n คือ จำนวนบัสในระบบไฟฟ้า

โดยจากแบบจำลองที่นำเสนอสามารถใช้เทคนิคของโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear programming) ในการแก้ปัญหาเพื่อพิจารณา

- กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ราคาที่พอใจในการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิต

โดยเทคนิคในการแก้สมการไม่เชิงเส้นที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือ Sequential Quadratic Programming : SQP ในการใช้วิธี SQP สามารถหาค่าที่เหมาะสมในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในรูปของสมการกำลังสองและภายใต้ข้อกำหนดที่เป็นเชิงเส้น

ในการนำเสนอนี้โปรแกรมไม่เชิงเส้นเป็นเครื่องมือที่ได้จากเครื่องในแม็ทแล็บ (MATLAB Optimisation Toolbox : MOT) ภายใต้การใช้ประโยชน์จากโปรแกรม MATPOWER โดยในกระบวนการจะอาศัยวิธี SQP ที่เป็นฟังก์ชันใน MOT เพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาสมการไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองที่นำเสนอ สำหรับ SQP เป็นโปรแกรมที่ประยุกต์ในงานจาก Quadratic Programming : QP ในการแก้ปัญหาที่อาศัยการปรับปรุงกระบวนการด้วยการทำซ้ำของการเคลื่อนที่ของทิศทางดังนี้

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k s_k \tag{4.18}$$

โดยที่ α คือ ช่วงความยาว (step length)
x คือ ตัวแปร
s คือ เวคเตอร์คงที่

ในการแก้ปัญหา SQP ต้องเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังสมการต่อไปนี้

$$Min[\frac{1}{2}s^T Hs + \nabla F(x)^T s] \tag{4.19}$$

$$\nabla g(x)^T s + g(x) = 0 : \text{ข้อจำกัดที่ต้องเป็นตามเงื่อนไขสมดุล} \tag{4.20}$$

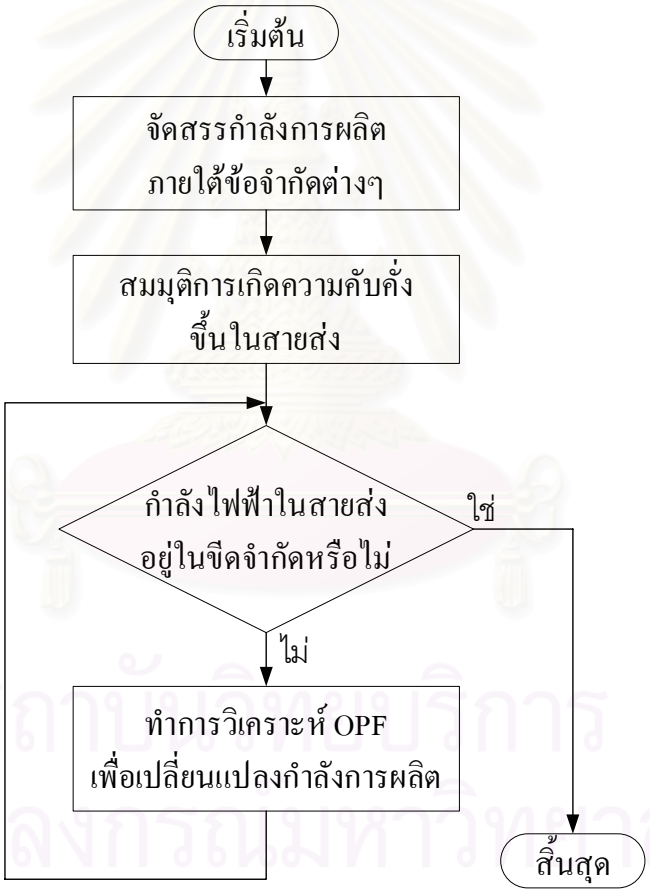
$$\nabla g(x)^T s + g(x) \le 0 : \text{ข้อจำกัดภายใต้ขอบเขตที่กำหนด} \tag{4.21}$$

โดยที่ H คือ Hessian matrix
F คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
g คือ ฟังก์ชันข้อจำกัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประยุกต์ใช้โปรแกรมไม่เชิงเส้นที่ในเสนอในแบบจำลองมีการประยุกต์ใช้งานจากเอ็ม-ไฟล์ (m-file) ใน MATPOWER โดยสามารถแสดงให้เห็นการทดสอบได้ในหัวข้อต่อไป

ในวิทยานิพนธ์มีการนำเสนอการแก้ไขปัญหาความคับคั่งในสายส่งโดยอาศัยกระบวนการในรูปที่ 4.5 โดยเริ่มจากการจัดสรรกำลังการผลิตภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ และหลังจากนั้นจะมีการสมมุติให้เกิดความคับคั่งในสายส่งและทำการจัดการความคับคั่งในสายส่งโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอเพื่อบรรเทาความคับคั่งที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งโดยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและโหลด



รูปที่ 4.5 ผังแสดงลำดับของกระบวนการ

บทที่ 5

ผลการจำลองเหตุการณ์และผลการวิเคราะห์

การนำเสนอการจำลองเหตุการณ์เพื่อวิเคราะห์ปัญหาความคับคั่งในสายส่งโดยในการนำเสนอมีการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองเหตุการณ์โดยทดสอบกับระบบ IEEE 30 บัส ข้อมูลบางส่วนถูกดัดแปลงให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ของ MATPOWER ซึ่งพัฒนาโดย Power System Engineering Research Center (PSERC), Cornell University ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.

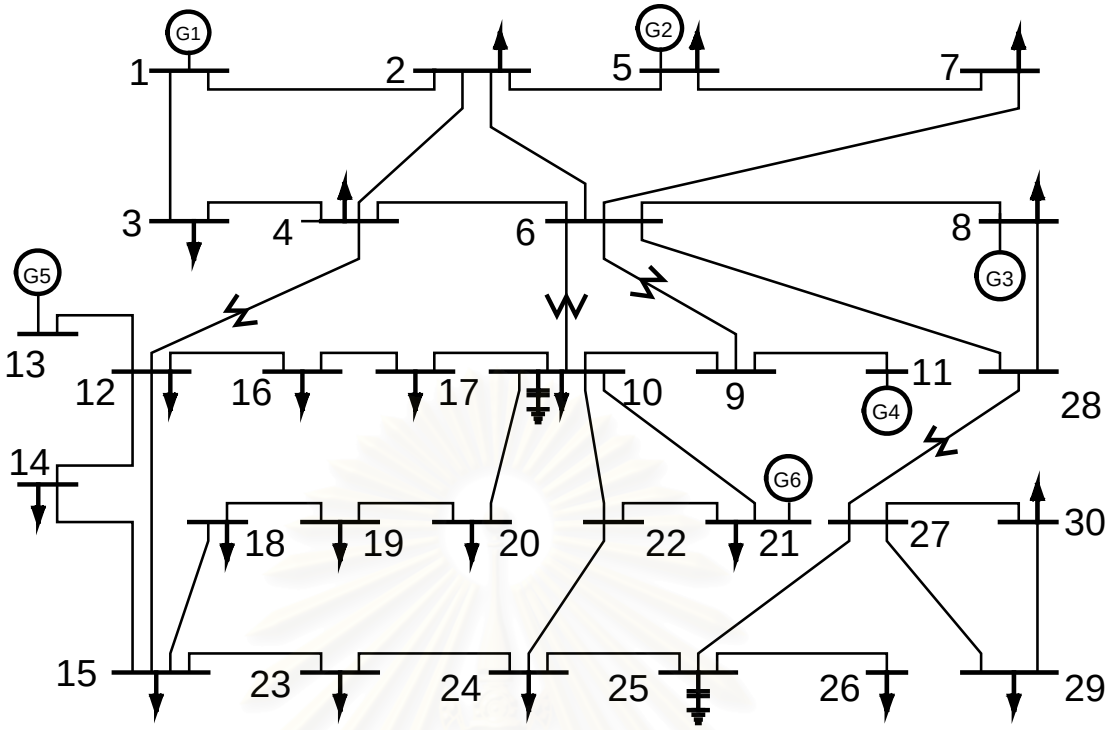
สำหรับการจำลองเหตุการณ์แบ่งเป็น 3 กรณี คือ

1. การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยการพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง
2. การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้าในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง
3. การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้าในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดและการอาศัยความรวมมือของคู่สัญญาระหว่างผู้ผลิตและโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง

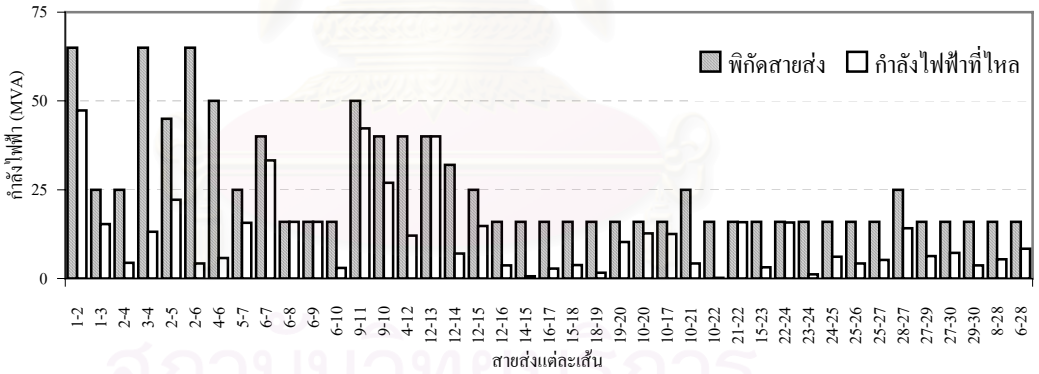
การทดสอบในวิทยานิพนธ์ใช้ค่า C_L เท่ากับ 10 $/MW-hr และใช้ค่า k เท่ากับ 2.8 ซึ่งทั้งสองค่าเป็นค่าที่สมมุติขึ้นมาเพื่อพิจารณาในระบบทดสอบเพราะว่าโดยทั่วไปในการหาค่า k จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ของระบบโดยที่การเลือกค่า k ต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและข้อตกลงของระบบนั้นๆ

5.1 กรณีศึกษาที่ 1 การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยการพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง

โดยการวิเคราะห์ภายใต้โครงสร้างของตลาดตามรูปที่ 4.1 มีการตกลงซื้อขายกันในช่วงเวลาทำการล่วงหน้าประกอบด้วยตลาดที่มีการทำสัญญาการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าและตลาดที่มีการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง แต่หลังจากนั้น ณ ช่วงเวลาจริงสมมุติให้มีเหตุการณ์ที่ส่งผลให้เกิดความคับคั่งในสายส่งที่ 6-8, 6-9, 21-22 และ 22-24 โดยมีกำลังไฟฟ้าไหลเกินพิกัดของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งต้องอาศัยการจัดการจากตลาดในช่วงเวลาทำการจริงเพื่อลดความคับคั่งในสายส่งที่มีปัญหาและเพื่อทำให้ระบบมีความสมดุล

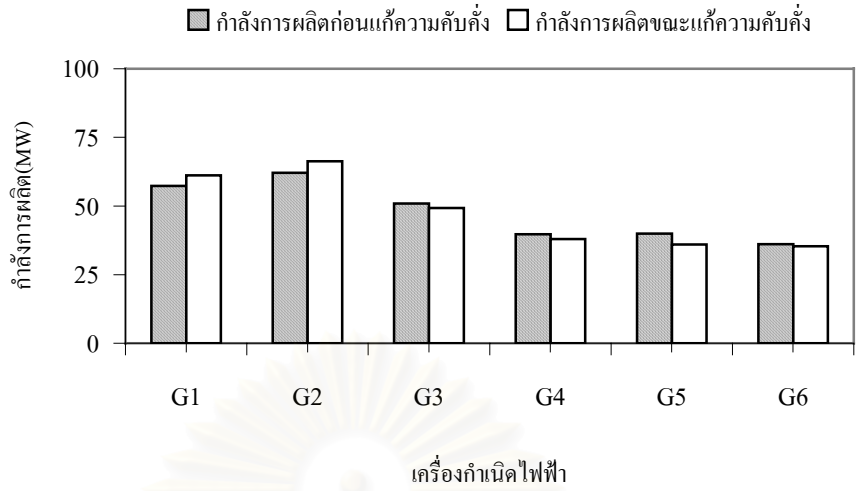


รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

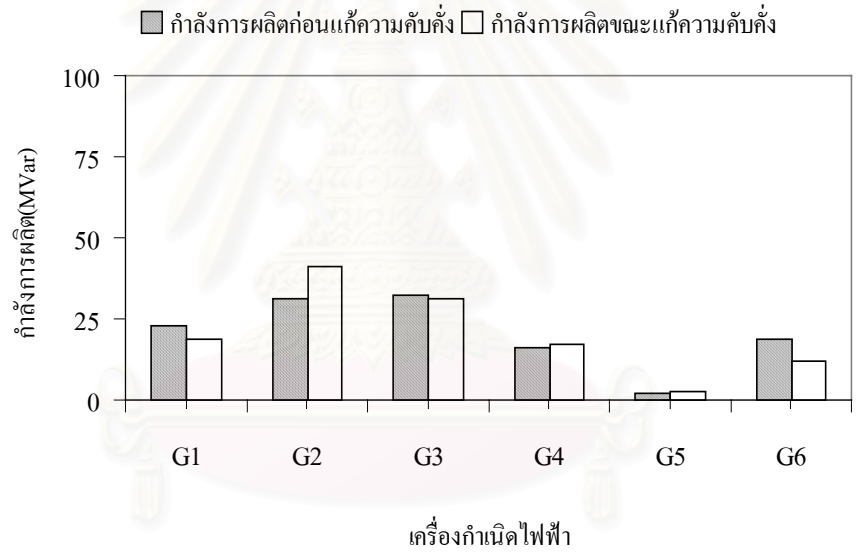


รูปที่ 5.2 พิกัดของสายส่งและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกรณีเกิดความคับคั่ง

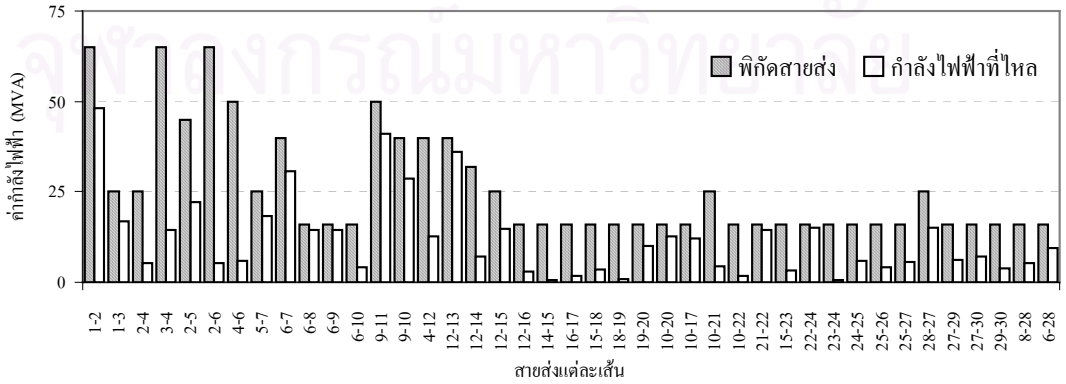
เมื่อเกิดปัญหาความคับคั่งขึ้นตลาด ณ ช่วงเวลาจริงก็ทำการแก้ปัญหาโดยจัดการความคับคั่งของระบบสายส่งดังกล่าวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอเพื่อทำให้ระบบมีกำลังไฟฟ้าไหลในสายส่งไม่เกินพิกัดของสายส่งและมีราคาที่เหมาะสม จากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 จะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องทำให้สามารถลดความคับคั่งการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ 6-8, 6-9, 21-22 และ 22-24 ดังแสดงในรูปที่ 5.5



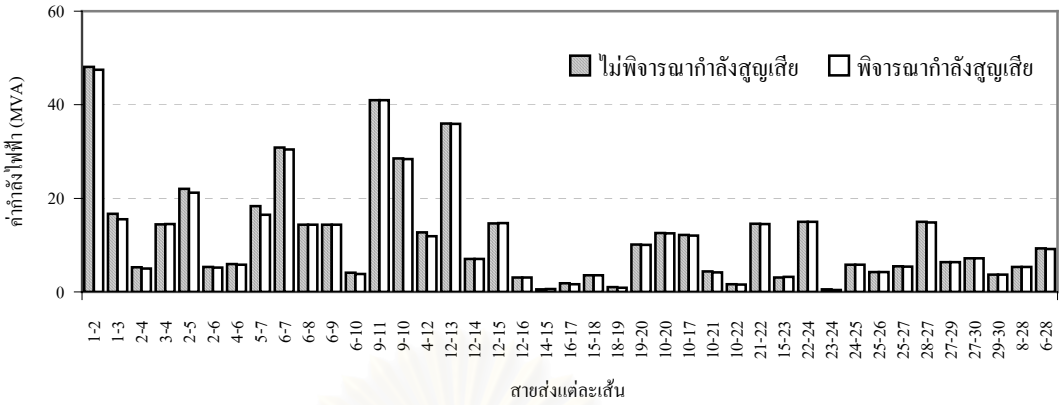
รูปที่ 5.3 การผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



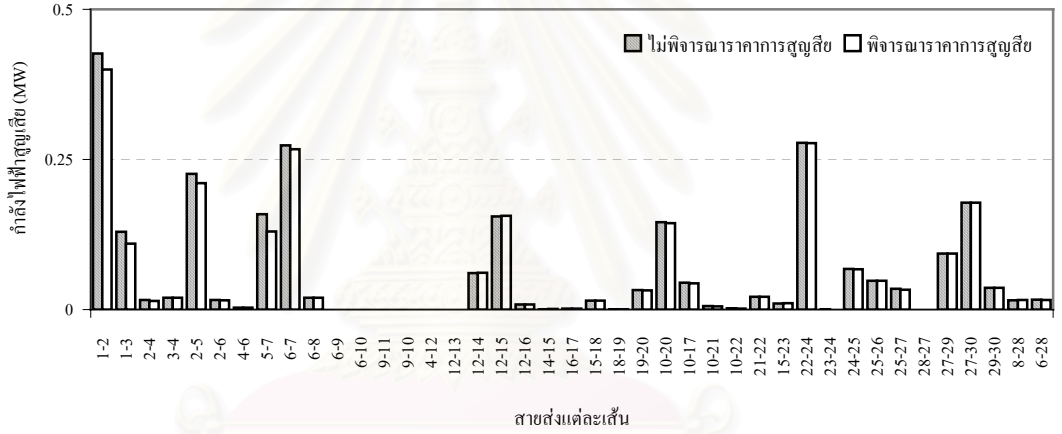
รูปที่ 5.4 การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.5 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่ง



รูปที่ 5.6 กำลังไฟฟ้าไหลในสายส่งกรณีรวมและไม่รวม
ราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียในฟังก์ชันวัตถุประสงค์



รูปที่ 5.7 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งกรณีรวมและไม่รวม
ราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียในฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 5.1 ค่าใช้จ่าย กำลังการผลิตและกำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีต่างๆ

ผลลัพธ์ที่พิจารณา	กรณีไม่มีการจัดการความคับคั่ง	กรณีมีการจัดการความคับคั่ง	
		ไม่พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย	พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย
Cost($/hr)	10,931.3	10,972.1	11,042.97
$\Delta Cost$ ($/hr)	0	40.8	111.67
PG (MW)	285.98	285.96	285.90
QG (MVAr)	123.82	123.18	122.99
Plosses(MW)	2.58	2.56	2.45

จากรูปที่ 5.6 เป็นการแสดงให้เห็นความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งในกรณีไม่พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียกับกรณีที่พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างดังกล่าวเกิดจากการจัดสรรกำลังการผลิตเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่งภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างกันโดยกรณีที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการคิดรวมราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งแต่ละเส้นลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.7

จากการพิจารณาในตารางที่ 5.1 พบว่าในกรณีที่ไม่เกิดความคับคั่งในสายส่งมีราคาค่าใช้จ่าย 10,931.3 $/hr และเมื่อมีการจัดการความคับคั่งในสายส่งพบว่ามีราคาการใช้จ่ายที่สูงขึ้นเป็น 10,972.1 $/hr ซึ่งราคาที่เพิ่มขึ้นประมาณ 40.8 $/hr เป็นราคาที่เกิดจากการขอความช่วยเหลือจากผู้ผลิตเพื่อจัดการความคับคั่งโดยค่าใช้จ่ายในส่วนที่เพิ่มขึ้นก็เป็นค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงจาก 285.98 MW เป็น 285.96 MW ดังแสดงในรูปที่ 5.3-5.4 และตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.2 การพิจารณาราคาจากการจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

การจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
ราคารวมกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	11,042.97
ราคาของเฉพาะการเปลี่ยนแปลง ($/hr)	111.67
ราคาของเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	68.60
ราคาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงไม่รวมราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	43.07

จากผลในตารางที่ 5.1 การจัดการความคับคั่งโดยไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีราคาค่าใช้จ่ายเท่ากับ 10,972.1 $/hr แต่ในกรณีที่จัดการความคับคั่งโดยพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียพบว่ามีราคารวมกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 11,042.97 $/hr ซึ่งราคาในส่วนนี้เกิดจากการรวมราคาที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมาอีก 111.67 $/hr โดยสามารถแยกเป็นราคาเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 68.60 $/hr ซึ่งในการพิจารณาเจ้าของสายส่งจะพิจารณาราคาในส่วนของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นราคาเทียมที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายจริงโดยตรง แต่เป็นการนำมารวมเพื่อปรับน้ำหนักของราคาค่าใช้จ่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียส่งผลทำให้ราคาค่าใช้จ่ายจริงๆ หลังจากหักราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 10,974.37 $/hr ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายของกรณีที่ไม่พิจารณาราคากำลังการสูญเสียพบว่ามีราคาที่มากกว่า ซึ่งราคาที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งจะมีส่วนที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง จากการจำลองพบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากเดิม 2.56 MW ลดลงเป็น 2.45 MW ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในอุตสาหกรรมไฟฟ้าถ้าเจ้าของสายส่งยอมเสียค่าใช้จ่ายจำนวนหนึ่งซึ่งอาจเพียงเล็กน้อยเพื่อทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

เพื่อแลกกับผลที่ได้เจ้าของสายส่งจะได้ประโยชน์จากกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงได้ เป็นต้นว่าระบบสายส่งสามารถรองรับปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระบบสายส่งจะมีประสิทธิภาพดีขึ้น รวมถึงจากคุณสมบัติของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกรณีนี้ยังสามารถทำให้เจ้าของสายส่งสามารถปรับน้ำหนักหรือให้ความสำคัญระหว่างการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตของผู้ผลิตไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบสายส่งได้

แต่อย่างไรก็ตามผลเนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการเพิ่มการพิจารณาในส่วนของราคาการสูญเสียซึ่งส่งผลสะท้อนให้การสูญเสียในสายส่งแต่ละเส้นลดลง ซึ่งค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะลดลงมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่าราคาของกำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าน้ำหนัก (k) ที่แสดงความสำคัญระหว่างการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตของผู้ผลิตไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบสายส่ง ถ้าค่าน้ำหนักเหมาะสมกับระบบจะส่งผลทำมีให้เกิดความเหมาะสมทั้งราคาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

ตารางที่ 5.3 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงต่อ 1 MW

กำลังไฟฟ้าจริง	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MW)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	1	0.66
G2	1	0.62
G3	1	0.75
G4	1	0.44
G5	1	0.45
G6	1	0.72

ตารางที่ 5.4 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อ 1 MW

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MVar)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	1	0.00000400
G2	1	0.00000306
G3	1	0.00000625
G4	1	0.00000391
G5	1	0.00000625
G6	1	0.00000689

จากตารางที่ 5.3-5.4 เป็นการแสดงให้เห็นของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าหนึ่งหน่วยที่สะท้อนราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ซึ่งจากตารางพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 4 มีราคาต่ำสุดและต่อจากนั้นก็เป็นเครื่องที่ 5, 2, 1, 6 และ 3 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามนอกจากราคาความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าจริงเพื่อบรรเทาความคับคั่งในสายส่ง เช่น

1. ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. ตำแหน่งที่ตั้งโหลดและค่าโหลด
3. ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งและรูปร่างโครงข่ายสายส่ง
4. ค่าพิกัดหรือข้อจำกัดของสายส่ง

ตารางที่ 5.5 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงกรณีไม่พิจารณาการช่วยเหลือของโหลด

กำลังไฟฟ้าจริง	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MW)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	3.45	9.59
G2	4.51	15.84
G3	-1.66	2.29
G4	-1.50	1.33
G5	-4.15	11.10
G6	-0.81	0.52

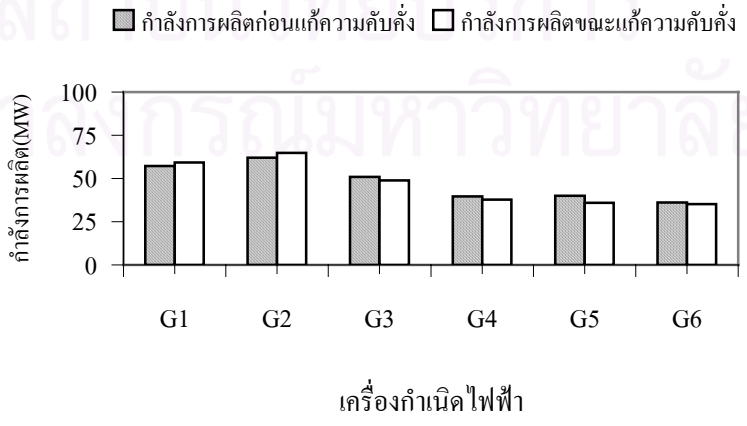
ตารางที่ 5.6 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกรณีไม่พิจารณาการช่วยเหลือของโหลด

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MVar)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	-2.18	0.010
G2	6.12	0.066
G3	-0.59	0.001
G4	0.59	0.002
G5	1.94	0.009
G6	-6.68	0.037

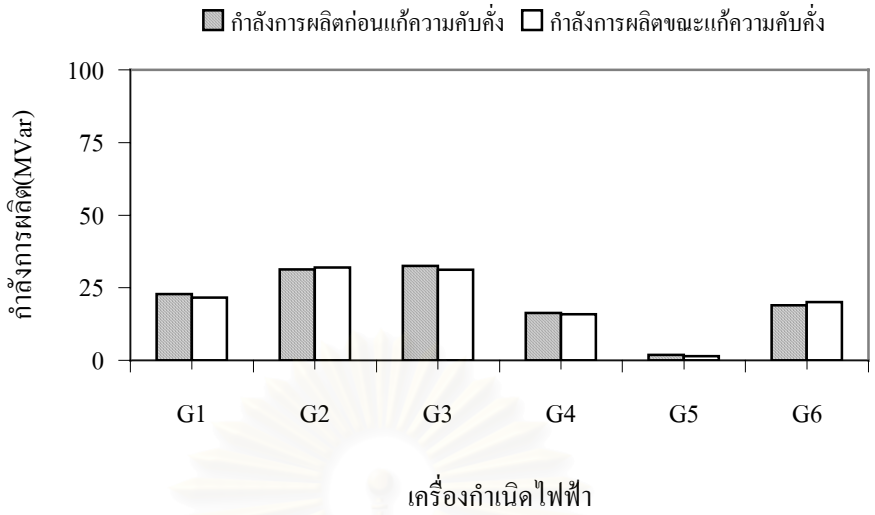
ค่าใช้จ่ายในส่วนของการช่วยเหลือระบบในกรณีที่ระบบมีปัญหาความคับคั่งจะขึ้นอยู่กับราคาการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เสนอผ่านราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของแต่ละเครื่องจะมีราคาค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงภายเงื่อนไขต่างๆ ตามข้อกำหนด โดยในการนำเสนอนี้เพียงเพื่อต้องการแสดงให้เห็นถึงแนวทางที่จะเป็นไปได้มากกว่าที่จะเน้นในเรื่องของราคาที่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามค่าส่วนใหญ่ที่ใช้ในการคำนวณจะอ้างอิงมาจาก IEEE

5.2 กรณีศึกษาที่ 2 การจำลองความคับคั่งโดยการพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้าในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง

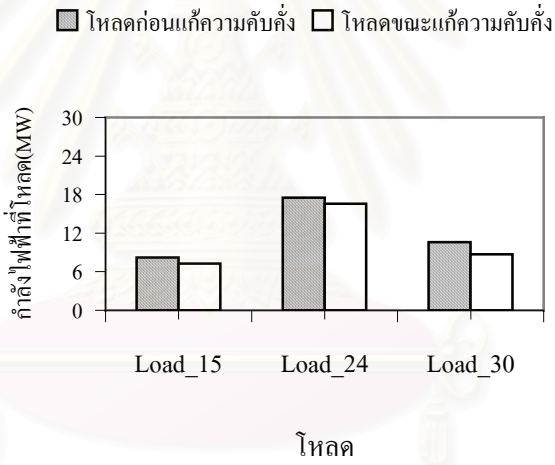
ในการจัดการความคับคั่งในสายส่งนั้นนอกจากการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตแล้วยังอาศัยความร่วมมือจากลูกค้าที่ปรับเปลี่ยนการใช้โหลดลดลง ซึ่งทางเจ้าของระบบสายส่งต้องมีค่าใช้จ่ายเพื่อชดเชยในส่วนที่ขอความช่วยเหลือในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากลูกค้า ในการจำลองการทำงานที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นการอาศัยการมีส่วนร่วมช่วยเหลือระบบโดยโหลดที่สามารถปรับกำลังการใช้งานได้ซึ่งจำลองให้โหลดที่บัส 15, 24 และ 30 สามารถปรับเปลี่ยนการลดโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่งได้ จากการทดสอบเมื่อทำการแก้ปัญหาความคับคั่งในรูปที่ 5.2 โดยทำการจัดการความคับคั่งของระบบสายส่งดังกล่าวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอเพื่อทำให้ระบบมีกำลังไฟฟ้าไหลในสายส่งไม่เกินพิกัดของสายส่งและมีราคาที่เหมาะสม จากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องและการลดโหลดที่บัสที่ 15, 24 และ 30 ดังแสดงในรูปที่ 5.8-5.10 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องและโหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังการใช้งานส่งผลทำให้สามารถลดความคับคั่งการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ 6-8, 6-9, 21-22 และ 22-24 ดังแสดงในรูปที่ 5.11



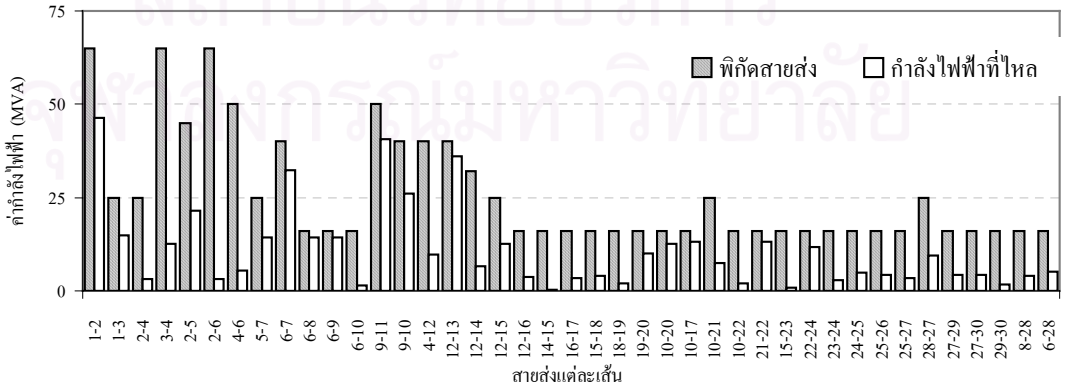
รูปที่ 5.8 การผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



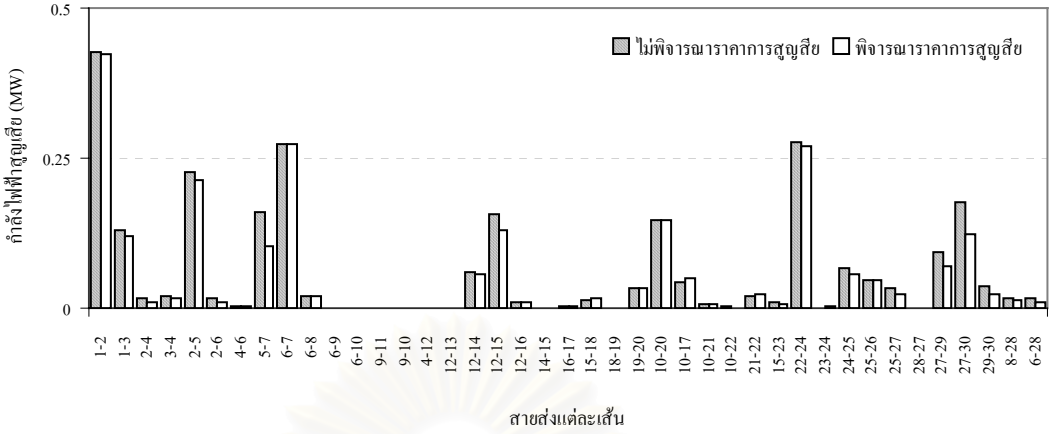
รูปที่ 5.9 การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.10 กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังได้

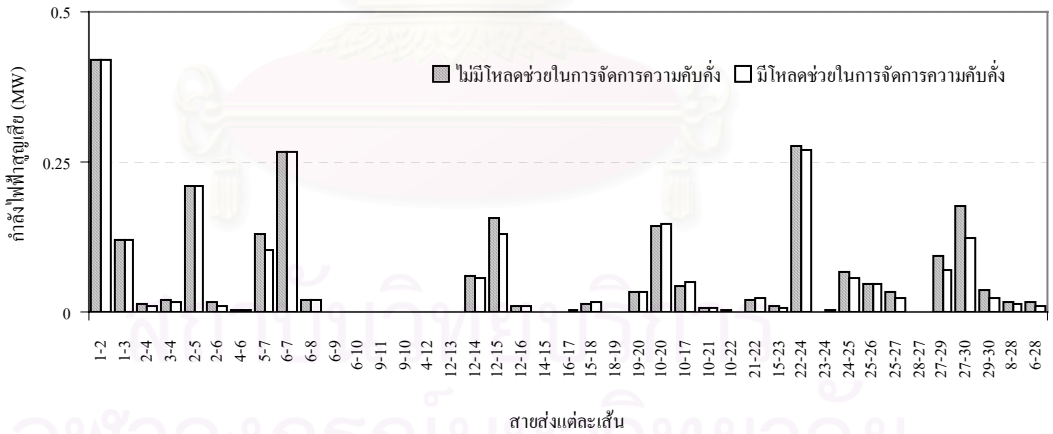


รูปที่ 5.11 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่ง



รูปที่ 5.12 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งกรณีที่อาศัยการพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย
ร่วมของโหลดและเปรียบเทียบกับกรณีไม่พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

จากรูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบการพิจารณาเพื่อแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่ง ประกอบด้วยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับการช่วยเหลือของโหลดที่ปรับค่าได้ จากการจำลองการทำงานพบว่าเมื่อมีการคิดราคากำลังการสูญเสียจะสามารถลดการสูญเสียในสายส่งได้



รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งกรณีอาศัยโหลดและ
ไม่อาศัยโหลดช่วยในการจัดการความคับคั่ง

จากรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบในกรณีที่มีการจัดการความคับคั่งโดยมีการพิจารณาราคาการสูญเสียที่อาศัยการมีส่วนร่วมช่วยเหลือของลูกค้าและการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตกับการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงการผลิตอย่างเดียวซึ่งจะเห็นได้ว่าจากการจำลองการทำงานพบ

ว่าจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและโหลดจะได้แนวโน้มที่ลดลงอย่างชัดเจนของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งแต่ละเส้น

ตารางที่ 5.7 ผลลัพธ์ที่พิจารณาของการจัดการความคับคั่งในกรณีต่างๆ

ผลลัพธ์ที่พิจารณา	กรณีมีการจัดการความคับคั่ง		
	ไม่พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย	พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียไม่มีโหลดช่วย	พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดช่วย
Cost($/hr)	10,972.1	11,042.97	11,027.54
$\Delta Cost$ ($/hr)	40.8	111.67	96.24
PG (MW)	285.96	285.90	285.73
QG (MVAr)	123.18	122.99	122.24
Plosses(MW)	2.56	2.45	2.30

จากตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบผลของการจัดการความคับคั่งในสายส่งซึ่งพบว่าในกรณีที่มีการจัดการความคับคั่งของสายส่งและพิจารณาราคาการสูญเสียจะมีราคาการใช้จ่ายที่สูงขึ้นโดยซึ่งค่าใช้จ่ายในส่วนที่เพิ่มขึ้นก็เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าบวกกับค่าใช้จ่ายในการชดเชยการลดการใช้โหลดของลูกค้าและในตารางจะพบว่าราคาของการพิจารณาราคาการสูญเสียโดยไม่อาศัยการมีส่วนร่วมของโหลดจะสูงกว่าราคาของการพิจารณาราคาการสูญเสียโดยอาศัยการมีส่วนร่วมของโหลดก็เนื่องจากการที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องหาความเหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ซึ่งผลจากการนำเสนอการช่วยเหลือของโหลดส่งผลทำให้ราคาค่าใช้จ่ายลดลง เหตุผลที่ต้องจ่ายราคาการเปลี่ยนแปลงการผลิตลดลงในกรณีที่ลดโหลดเป็นผลมาจากกำลังการสูญเสียในระบบลดลงส่งผลทำให้ราคาค่าใช้จ่ายถูกกว่า อย่างไรก็ตามถ้าเกิดว่าราคาที่เกิดจากความพอใจในการเปลี่ยนแปลงโหลดมีค่าสูงมากซึ่งอาจจะทำให้ราคาของการไม่อาศัยการช่วยเหลือของโหลดถูกกว่า ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการในการจัดสรรเพื่อให้เกิดความเหมาะสมและสร้างความสมดุลให้กับระบบ

ตารางที่ 5.8 การพิจารณาราคากรณีมีการจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ราคา	การจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
	กรณีไม่มีการช่วยเหลือของโหลด	กรณีมีการช่วยเหลือของโหลด
ราคารวมกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	11,042.97	11,027.54
ราคาของเฉพาะการเปลี่ยนแปลง($/hr)	111.67	96.24
ราคาของเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	68.60	64.40
ราคาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงไม่รวมราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	43.07	31.87
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)	2.45	2.30
ราคาที่ต้องจ่าย ($/hr)	10,974.37	10,963.17

ผลจากตารางที่ 5.8 การจัดการความคับคั่งโดยมีการพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียและมีการช่วยเหลือจากการลดโหลดมีราคาค่าใช้จ่ายเท่ากับ 11,027.54 $/hr ซึ่งราคาในส่วนนี้เป็นราคาที่เกิดจากการรวมราคาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลดและกำลังการผลิตและราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียแต่ในกรณีที่จัดการความคับคั่งโดยมีการพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียแต่ไม่มีการช่วยเหลือของโหลดจะพบว่ามีราคารวมกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 11,042.97 $ และจากราคานี้สามารถแยกออกเป็นราคาเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งในการพิจารณาเจ้าของสายส่งจะพิจารณาราคาในส่วนของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นราคาเทียมที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายจริงโดยตรง แต่เป็นการนำมารวมเพื่อปรับน้ำหนักของราคาค่าใช้จ่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียส่งผลทำให้ราคาค่าใช้จ่ายจริงๆหลังจากหักราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ (11,042.97+68.60=10,974.37) $ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายของกรณีที่พิจารณาราคากำลังการสูญเสียโดยที่อาศัยการมีส่วนร่วมของลูกค้าและผู้ผลิตหลังจากหักค่าราคาเทียมแล้วพบว่ามีราคาที่มากกว่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าในกรณีที่มีการพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งโดยอาศัยการมีส่วนร่วมของโหลดจะส่งผลทำการสูญเสียลดลงจากเดิม 2.45 MW ลดเป็น 2.30 MW ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการนำโหลดมาช่วยในการจัดการความคับคั่งจะสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลงด้วย ผลดังกล่าวก็เนื่องจากผู้ผลิตต้องจ่ายกำลังการผลิตลดลงตามโหลดที่ลดลงและเกิดจากการจัดสรรเพื่อให้เกิดความเหมาะสมตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้นำเสนอ

ตารางที่ 5.9 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงต่อ 1 MW

กำลังไฟฟ้าจริง	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตและการเปลี่ยนแปลงโหลด (MW)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตการเปลี่ยนแปลงโหลด ($/hr)
G1	1	0.66
G2	1	0.62
G3	1	0.75
G4	1	0.44
G5	1	0.45
G6	1	0.72
โหลดบัส 15	1	0.90
โหลดบัส 24	1	0.90
โหลดบัส 30	1	0.90

ตารางที่ 5.10 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อ 1 MW

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MVar)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	1	0.00000400
G2	1	0.00000306
G3	1	0.00000625
G4	1	0.00000391
G5	1	0.00000625
G6	1	0.00000689

จากตารางที่ 5.9-5.10 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่เท่ากันแล้วราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดมีราคาต่อหนึ่งหน่วยเท่าไหร่ จากตารางพบว่าราคาของโหลดจะสูงสุดและต่อจากนั้นก็ของเครื่องกำเนิดเครื่องที่ 3, 6, 1, 2 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.11 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและโหลด

กำลังไฟฟ้าจริง	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตและการเปลี่ยนแปลงโหลด (MW)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตการเปลี่ยนแปลงโหลด ($/hr)
G1	1.91	2.96
G2	2.89	6.53
G3	-2.07	3.58
G4	-1.99	2.37
G5	-4.02	10.39
G6	-0.89	0.63
โหลดบัส 15	0.95	0.87
โหลดบัส 24	0.95	0.87
โหลดบัส 30	1.91	3.45

ตารางที่ 5.12 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

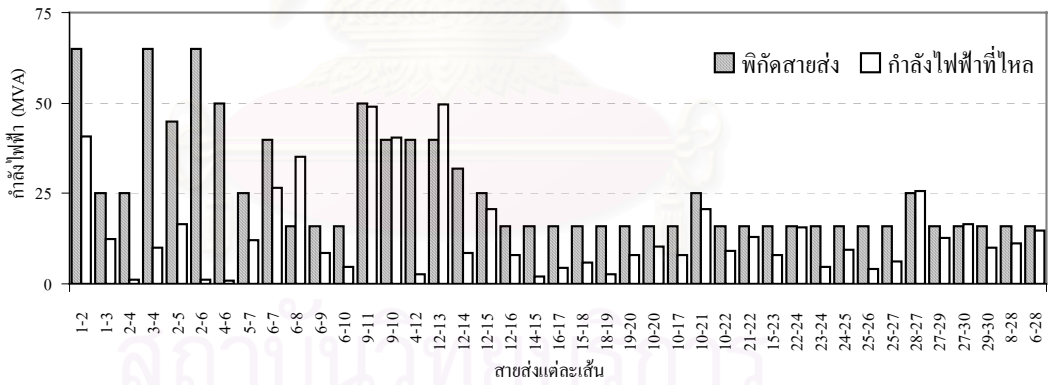
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MVar)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	-1.215	0.002955
G2	0.653	0.000748
G3	-1.225	0.003756
G4	-0.446	0.001248
G5	-0.434	0.000471
G6	1.090	0.000986

ดังนั้นจะพบว่าค่าใช้จ่ายในส่วนของการช่วยเหลือระบบในกรณีที่ระบบมีปัญหาความคับคั่งก็ขึ้นอยู่ราคาการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่เสนอผ่านราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตและราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงของโหลด

บางกรณีมีความคับคั่งเกิดขึ้นในสายส่งปริมาณสูงๆ บางครั้งการเปลี่ยนแปลงเฉพาะการผลิตอย่างเดียวไม่สามารถที่จะจัดการเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่งลงได้ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการมีส่วนร่วมของโหลดจึงจะสามารถจัดการความคับคั่งในสายส่งลงได้ดังแสดงจากการจำลองการทำงานดังต่อไปนี้

จากการจำลองการทำงานให้เกิดความคับคั่งเกิดขึ้นโดยมีการจำลองให้มีการเพิ่มการใช้โหลดที่บัส 2 จากเดิม 21.7 เป็น 25.7 และบัสที่ 30 จากเดิม 10.6 เป็น 25.6 โดยการสมมุตินี้เพื่อจะแสดงให้เห็นผลชัดเจนในการเปรียบเทียบกรณีของการจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตอย่างเดียวกับการพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตร่วมกับการเปลี่ยนแปลงโหลดว่ากรณีที่เกิดความคับคั่งมากๆ จำเป็นต้องอาศัยการมีส่วนร่วมของโหลด ดังแสดงต่อไปนี้

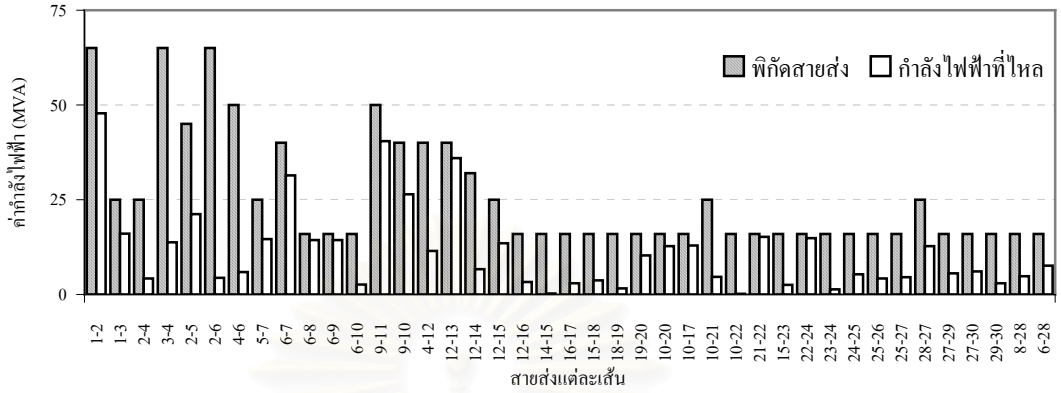
จากรูปที่ 5.14 จำลองเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเดียวเพื่อบรรเทาความคับคั่งในสายส่งซึ่งพบว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะลดความคับคั่งในสายส่งลง เนื่องจากเมื่อจำลองการทำงานแล้วเป็นไปไม่ได้ที่จะปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตอย่างเดียวแล้วจะสามารถทำให้แก้ไขปัญหาความคับคั่งได้



รูปที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่ง
กรณีมีการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเดียว

แต่จะพบว่าเมื่อมีการช่วยเหลือโดยการลดการใช้โหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนโหลดได้จะส่งผลทำให้สามารถแก้ไขปัญหาความคับคั่งได้ดังแสดงในรูปที่ 5.15 เมื่อมีการปรับลดโหลดที่บัส 15, 24 และ 30 ส่งผลทำให้สามารถลดความคับคั่งในสายได้ดังนั้นแสดงว่าถ้ามีการช่วยเหลือของ

โหลดในกรณีที่ระบบมีปัญหาก็จะทำให้โอกาสในการแก้ปัญหาเพิ่มขึ้นทำให้ระบบมีความมั่นคงมากขึ้น

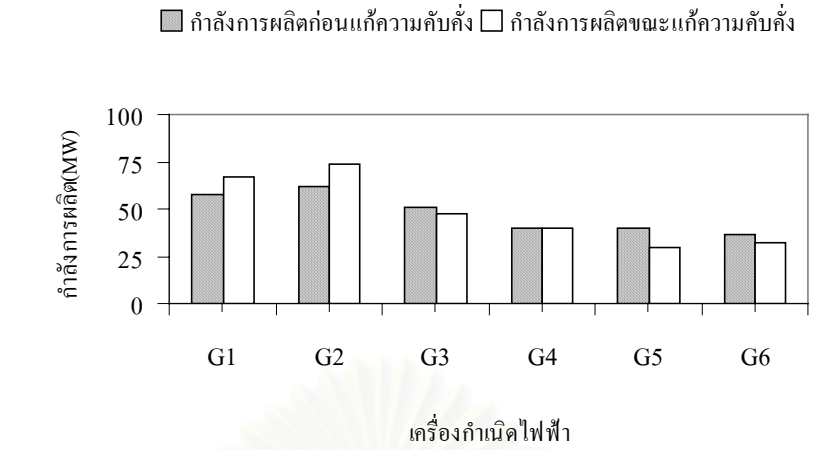


รูปที่ 5.15 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเมื่อมีการจัดการความคับคั่งมีการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการลดโหลด

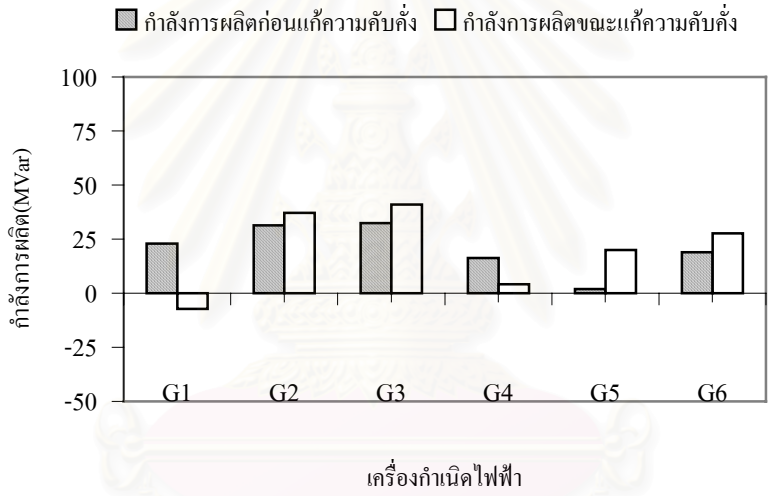
ตารางที่ 5.13 ผลของการจัดการความคับคั่งโดยอาศัยการช่วยเหลือของโหลด

ผลลัพธ์ที่พิจารณา	การจัดการความคับคั่งโดยอาศัยการช่วยเหลือของโหลด
ราคารวมกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	11,376.5
ราคาของเฉพาะการเปลี่ยนแปลง($/hr)	445.2
ราคาของเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	86.8
ราคาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงไม่รวมราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	358.4
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)	3.10

โดยจากการจำลองการทำงานต้องปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 6 เครื่องและลดการใช้โหลด ณ บัสที่ 15, 21 และ 30 ดังรูปที่ 5.16-5.18 จึงสามารถจัดการปัญหาความคับคั่งในสายส่งได้ แต่อย่างไรก็ตามในการจัดการความคับคั่งในสายส่งยังต้องอาศัยปัจจัยหลายๆ อย่างเพื่อที่จะสามารถแก้ไขปัญหาให้ได้ แต่สิ่งที่จะทำให้การแก้ปัญหาประสบผลสำเร็จมากที่สุดก็คือการที่สมาชิกในตลาดมีการร่วมมือเพื่อช่วยกันแก้ปัญหาอย่างจริงจัง

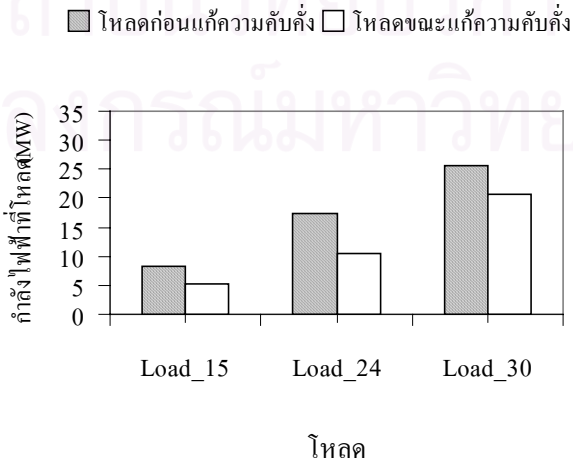


รูปที่ 5.16 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.17 การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.18 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังได้

ในการพิจารณาให้การจัดการสอดคล้องกับความจริงให้มากที่สุดต้องมีการดัดแปลงฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยเพิ่มค่าตัวคูณเพื่อให้ความสำคัญระหว่างการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและการปรับเปลี่ยนโหลดดังแสดงในสมการ (5.1) โดยการเพิ่มค่าตัวคูณดังกล่าวเพื่อปรับให้ความสำคัญกับเทอมของการปรับโหลดว่าสามารถช่วยเหลือระบบได้มากหรือน้อยแค่ไหนเพราะโดยทั่วไปในการปรับเปลี่ยนโหลดจะให้เป็นทางเลือกสุดท้ายในการแก้ปัญหาในกรณีการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตไม่สามารถแก้ไขปัญหาความคับคั่งได้

$$Minimize: KG\sum_{i=1}^{ng}[C_{pi}(\Delta P_{gi}) + C_{qi}(\Delta Q_{gi})] + KL\sum_{i=1}^{nL} C_{load}(\Delta P_{Li}) + kC_L(Ploss) \quad (5.1)$$

โดยที่

KG คือ ตัวคูณเพื่อปรับน้ำหนักให้ความสำคัญการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิต

KL คือ ตัวคูณเพื่อปรับน้ำหนักให้ความสำคัญการปรับเปลี่ยนโหลด

ถ้าค่า KG, KL มีค่าใกล้เคียงกันหมายความว่าในระบบให้ความสำคัญระหว่างการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและการปรับเปลี่ยนโหลดใกล้เคียงกัน แต่ถ้าค่า K ตัวไหนมากกว่าก็หมายความว่าต้องการให้ความสำคัญในการช่วยเหลือระบบน้อยกว่าและถ้าค่า K ตัวไหนน้อยกว่าก็หมายความว่าต้องการให้ความสำคัญในการช่วยเหลือระบบมากกว่าดังแสดงตัวอย่างการพิจารณาในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 พิจารณาการปรับค่า KL ที่ค่าต่างๆ

KL	ราคาการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต	ราคาการเปลี่ยนแปลงกำลัง โหลด	ราคาการเปลี่ยนแปลงรวม
1	25.50	5.10	30.64
5	31.19	0.92	32.11
10	34.24	0.34	34.58
15	35.86	0.19	36.05
20	36.89	0.12	37.01
25	37.61	0.08	37.69
30	38.14	0.06	38.2
35	35.55	0.05	38.59
40	38.88	0.04	38.91

ตารางที่ 5.14 พิจารณาการปรับค่า KL ที่ค่าต่างๆ (ต่อ)

KL	ราคาการเปลี่ยนแปลง กำลังการผลิต	ราคาการเปลี่ยนแปลง กำลัง โหลด	ราคาการเปลี่ยนแปลง รวม
45	39.14	0.03	39.17
50	39.35	0.02	39.38
75	40.05	0.01	40.06
100	40.42	0.01	40.43
1000	41.25	0.00	41.25

5.3 กรณีศึกษาที่ 3 การจำลองความคับคั่งในสายส่งโดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตและการขอความร่วมมือจากลูกค้าในการปรับเปลี่ยนการใช้โหลดและการอาศัยความรวมมือของคู่สัญญาระหว่างผู้ผลิตและโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง

ในการจัดการความคับคั่งในสายส่งนั้นนอกจากการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและอาศัยความร่วมมือจากลูกค้าที่ปรับเปลี่ยนการใช้โหลดลดลงแล้วยังมีการการอาศัยความรวมมือของคู่สัญญาระหว่างผู้ผลิตและโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง ซึ่งทางเจ้าของระบบสายส่งต้องมีค่าใช้จ่ายเพื่อชดเชยในส่วนที่ขอความช่วยเหลือในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากลูกค้าและการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของคู่สัญญา ในการจำลองการทำงานที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นการอาศัยการมีส่วนร่วมช่วยเหลือระบบโดยโหลดที่สามารถปรับกำลังการใช้งานได้ซึ่งจำลองให้โหลดที่บัส 15, 24 และ 30 สามารถปรับเปลี่ยนการลดโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่งได้ โดยมีการตกลงระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 (G1) กับลูกค้าที่บัส 2 และระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 (G5) กับลูกค้าที่บัส 12 ที่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังการใช้งานของโหลดและกำลังการผลิตเพื่อช่วยเหลือในกรณีที่เกิดความคับคั่งขึ้นในระบบ

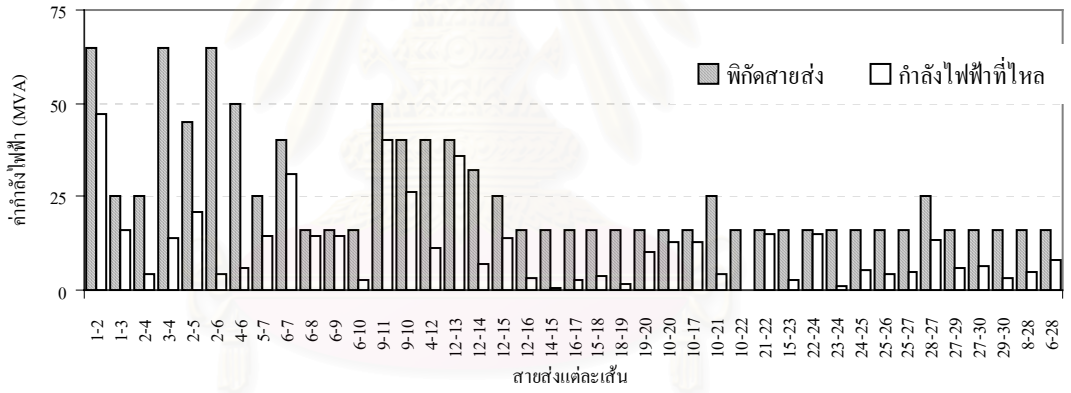
เมื่อทำการแก้ปัญหาความคับคั่งในรูปที่ 5.2 โดยทำการจัดการความคับคั่งของระบบสายส่งดังกล่าวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอเพื่อทำให้ระบบมีกำลังไฟฟ้าไหลในสายส่งไม่เกินพิกัดของสายส่งและมีราคาที่เหมาะสม จากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องและการลดโหลดที่บัสที่ 15, 24 และ 30 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องและปรับเปลี่ยนกำลังการใช้งานของโหลดและการเปลี่ยนแปลงของคู่สัญญาส่งผลทำให้สามารถลดความคับคั่งการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ 6-8, 6-9, 21-22 และ 22-24 ดังแสดงในรูปที่ 5.19

ตารางที่ 5.15 ค่าที่ได้จากการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดในกรณีปกติ

บัส	แรงดันไฟฟ้า (pu.)	มุม (องศา)	กำลังการผลิต		กำลังไฟฟ้าที่โหลด	
			กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)
1	1.047	0	57.302	22.861	-	-
2	1.029	-1.251	-	-	21.7	12.7
3	1.027	-0.898	-	-	2.4	1.2
4	1.022	-1.071	-	-	7.6	1.6
5	1.022	-3.701	62.041	31.301	94.2	19
6	1.022	-1.195	-	-	-	-
7	1.013	-2.692	-	-	22.8	10.9
8	1.024	-0.855	50.917	32.474	30	30
9	1.02	0.65	-	-	-	-
10	1.007	-0.806	-	-	5.8	2
11	1.05	5.111	39.692	16.336	-	-
12	0.993	-0.521	-	-	11.2	7.5
13	0.994	2.73	39.956	1.869	-	-
14	0.98	-1.452	-	-	6.2	1.6
15	0.979	-1.529	-	-	8.2	2.5
16	0.992	-0.984	-	-	3.5	1.8
17	0.997	-1.068	-	-	9	5.8
18	0.976	-2.061	-	-	3.2	0.9
19	0.978	-2.157	-	-	9.5	3.4
20	0.984	-1.871	-	-	2.2	0.7
21	1.009	-0.683	36.073	18.985	17.5	11.2
22	1.006	-0.815	-	-	-	-
23	0.975	-1.875	-	-	3.2	1.6
24	0.978	-1.949	-	-	8.7	6.7
25	0.975	-3.341	-	-	-	-

ตารางที่ 5.15 ค่าที่ได้จากการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดในกรณีปกติ (ต่อ)

บัส	แรงดันไฟฟ้า (pu.)	มุม (องศา)	กำลังการผลิต		กำลังไฟฟ้าที่โหลด	
			กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)
26	0.957	-3.805	-	-	3.5	2.3
27	0.983	-3.918	-	-	-	-
28	1.017	-1.34	-	-	-	-
29	0.962	-5.265	-	-	2.4	0.9
30	0.95	-6.212	-	-	10.6	1.9
ราม			285.98	123.82	283.40	126.20
กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งรวม			2.58 MW			
ราคาค่าใช้จ่ายรวม			10,931.3 $/hr			



รูปที่ 5.19 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกรณีมีการจัดการความคับคั่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.16 ค่าที่ได้จากการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดในกรณีที่เกิดความคับคั่ง

บัส	แรงดันไฟฟ้า (pu.)	มุม (องศา)	กำลังการผลิต		กำลังไฟฟ้าที่โหลด	
			กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)
1	1.05	0	57.981	21.414	-	-
2	1.033	-1.263	0.946	0	21.7	12.7
3	1.03	-1.002	-	-	2.4	1.2
4	1.025	-1.2	-	-	7.6	1.6
5	1.027	-3.588	63.54	32.237	94.2	19
6	1.025	-1.324	-	-	-	-
7	1.017	-2.721	-	-	22.8	10.9
8	1.026	-1.015	48.951	31.554	30	30
9	1.023	0.326	-	-	-	-
10	1.01	-1.121	-	-	5.8	2
11	1.05	4.596	38.094	14.858	-	-
12	0.997	-0.985	0.216	0	11.2	7.5
13	0.999	1.91	35.924	2.341	-	-
14	0.984	-1.869	-	-	6.2	1.6
15	0.984	-1.909	0.431	0	8.2	2.5
16	0.996	-1.379	-	-	3.5	1.8
17	1.001	-1.406	-	-	9	5.8
18	0.98	-2.411	-	-	3.2	0.9
19	0.982	-2.491	-	-	9.5	3.4
20	0.988	-2.2	-	-	2.2	0.7
21	1.013	-1.011	35.129	19.697	17.5	11.2
22	1.01	-1.132	-	-	-	-
23	0.98	-2.179	-	-	3.2	1.6
24	0.983	-2.156	0.724	0	8.7	6.7
25	0.98	-3.371	-	-	-	-

ตารางที่ 5.16 ค่าที่ได้จากการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดในกรณีที่เกิดความคับคั่ง(ต่อ)

บัส	แรงดันไฟฟ้า (pu.)	มุม (องศา)	กำลังการผลิต		กำลังไฟฟ้าที่โหลด	
			กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)
26	0.962	-3.83	-	-	3.5	2.3
27	0.988	-3.84	-	-	-	-
28	1.02	-1.461	-	-	-	-
29	0.969	-5.032	-	-	2.4	0.9
30	0.959	-5.811	1.349	0	10.6	1.9
ราม			285.7	122.1	283.4	126.2
กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งรวม			2.30 MW			
ราคาค่าใช้จ่ายรวม			11,020.65 $/hr			

ตารางที่ 5.17 ค่าที่ได้จากการจัดสรรกรณีปกติและกรณีที่มีการจัดการความคับคั่ง

ผลลัพธ์ที่พิจารณา	กรณีปกติ	กรณีมีการจัดการความคับคั่ง
Cost($/hr)	10,931.3	11,020.65
$\Delta Cost$ ($/hr)	0	89.34
PG (MW)	285.98	283.7
QG (MVAr)	123.82	122.1
Plosses(MW)	2.58	2.30

จากตารางที่ 5.17 เป็นการแสดงให้เห็นผลของการจัดสรรกำลังการผลิตและการเปลี่ยนแปลงโหลดในการแก้ปัญหาความคับคั่งโดยจากการเปรียบเทียบในกรณีปกติจะมีราคาค่าใช้จ่าย 10,931.3 $/hr โดยที่ไม่มีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงระบบเพื่อบรรเทาความคับคั่งแต่หลังจากเกิดความคับคั่งเกิดขึ้นพบว่าต้องมีการจัดสรรเพื่อเปลี่ยนแปลงทั้งกำลังการผลิตและโหลดซึ่งต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงอีก 89.34 $/hr เพื่อที่จะให้ระบบเกิดความสมดุล ซึ่งเมื่อนำมาหักค่าใช้จ่ายเทียมที่เป็นค่าใช้จ่ายที่สะท้อนกำลังสูญเสียแล้วพบว่าเหลือค่าใช้จ่ายที่ต้องจ่ายเพิ่มกรณีปกติอีก (89.34-65.52=23.82 $/hr)

ตารางที่ 5.18 การพิจารณาราคาเมื่อมีการจัดการความคับคั่ง

การจัดการความคับคั่งโดยพิจารณาราคากำลังสูญเสีย	
ราคารวมกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	11,020.65
ราคาของเฉพาะการเปลี่ยนแปลง ($/hr)	89.34
ราคาของเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	65.52
ราคาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงไม่รวมราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($/hr)	23.82

ตารางที่ 5.19 ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจริงกรณีปกติและกรณีที่มีการจัดการความคับคั่ง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง (MW)	
	กรณีปกติ	กรณีจัดการความคับคั่ง
G1	57.3	57.98
G2	62.04	63.54
G3	50.91	48.95
G4	39.692	38.09
G5	39.956	35.92
G6	36.073	35.13

ตารางที่ 5.20 ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้ารีแอกทีฟกรณีปกติและกรณีที่มีการจัดการความคับคั่ง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	
	กรณีปกติ	กรณีจัดการความคับคั่ง
G1	22.86	21.41
G2	31.3	32.24
G3	32.47	31.55
G4	16.33	14.86
G5	1.86	2.341
G6	18.98	19.69

ตารางที่ 5.21 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริง

กำลังไฟฟ้าจริง	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MW)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	0.68	0.38
G2	1.5	1.77
G3	-1.96	3.21
G4	-1.602	1.52
G5	-4.036	10.47
G6	-0.943	0.71
รวมค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริง		18.058

ตารางที่ 5.22 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงการลดใช้โหลด

ผลลัพธ์ที่พิจารณา	การเปลี่ยนแปลงโหลด (MW)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงโหลด($/hr)
โหลดบัส 15	0.431	0.19
โหลดบัส 24	0.724	0.51
โหลดบัส 30	1.349	1.74
รวมค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลด		2.44

ตารางที่ 5.23 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (MVar)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต ($/hr)
G1	-1.45	0.004205
G2	0.94	0.001546
G3	-0.92	0.002116
G4	-1.47	0.013506
G5	0.481	0.000578
G6	-0.71	0.000418
รวมค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ		0.022369

ตารางที่ 5.24 ค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนแปลงการลดใช้โหลดและกำลังการผลิตของคู่สัญญา

ผลลัพธ์ที่พิจารณา	การเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตและการเปลี่ยนแปลงโหลด (MW)	ราคาที่เกิดจากความพอใจของการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตและการเปลี่ยนแปลงโหลด($/hr)
โหลดบัส 2	0.216	0.05
โหลดบัส 12	0.946	0.77
G1	0.679	0.38
G5	1.778	2.11
รวมค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคู่สัญญา		3.31

ตารางที่ 5.25 สรุปผลการจำลองทั้ง 3 กรณี

ผลลัพธ์ที่พิจารณา	กรณีปกติ	กรณีมีการจัดการความคับคั่ง			
		กรณีที่ 1 ไม่พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย	พิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสีย		
			กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
Cost($/hr)	10,931.3	10,972.1	11,042.9	11,027.5	11,020.65
$\Delta Cost$ ($/hr)	0	40.8	111.67	96.24	89.34
Plosses(MW)	2.58	2.56	2.45	2.30	2.30
ราคาการสูญเสีย($/hr)	-	0	68.60	64.40	65.52
ราคาการเปลี่ยนแปลงที่ต้องจ่ายจริง	-	40.8	43.07	31.87	23.82

5.4 บทสรุป

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าเมื่อระบบไฟฟ้ามีข้อจำกัดทางด้านสายส่งเกิดขึ้นต้องอาศัยความร่วมมือจากสมาชิกในตลาดที่ประกอบด้วยผู้ผลิต, ลูกค้า, ผู้ค้าปลีก ฯลฯ เพื่อช่วยเหลือระบบในกรณีที่เกิดปัญหาขึ้นกับระบบ โดยพบว่าในการจัดการความคับคั่งถ้ามีการพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียไปด้วยก็จะสะท้อนทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบลดลงด้วย

บทที่ 6

สรุปผลวิจัย

6.1 สรุปผลวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่งโดยอาศัยกฎและกลไกลของตลาด โดยการจัดการในวิทยานิพนธ์อาศัยความร่วมมือจากผู้ผลิตเพื่อปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตร่วมกับอาศัยความร่วมมือจากการลดการใช้โหลดในกรณีที่เกิดความคับคั่งขึ้น และมีการพิจารณาราคากำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งเป็นราคาเทียมที่เพิ่มขึ้นมาในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ความสำคัญในการสะท้อนกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบให้ลดลง โดยทางเจ้าของระบบจะมีการชดเชยค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าดังกล่าวให้ทั้งผู้ผลิตและโหลด โดยที่ผู้ผลิตและโหลดต้องส่งราคาที่พอใจสำหรับการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเพื่อเจ้าของระบบจะทำการจัดสรรการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตและการใช้โหลดในกรณีที่เกิดความคับคั่งเกิดขึ้น ซึ่งถ้าเกิดเจ้าของระบบเป็นเจ้าของสายส่งและมีหน้าที่รับผิดชอบการผลิตด้วยผลประโยชน์ที่ได้จากการจัดสรรก็ย่อมเกิดกับเจ้าของระบบอย่างแท้จริงเนื่องจากสามารถรู้ข้อมูลทางกายภาพและข้อมูลทางการเงินที่เป็นประโยชน์ในการจัดสรรส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการจัดสรรอย่างแท้จริง การนำเสนอนี้อาจยังไม่เกิดขึ้นกับประเทศไทยในอนาคตอันใกล้นี้แต่เป็นการเตรียมความพร้อมและชี้ให้เห็นแนวทางที่เป็นไปได้สำหรับการแก้ปัญหาความคับคั่งและยังพบว่าแนวโน้มของกิจการไฟฟ้าในประเทศไทยในอนาคตมีโอกาสที่จะเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าเข้ากับประเทศเพื่อนบ้านเพื่อเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้าซึ่งโอกาสเกิดความคับคั่งจึงมีมากขึ้นด้วย

โดยในวิทยานิพนธ์มีการจำลองข้อมูลที่ได้จากการประยุกต์ใช้ระบบ IEEE 30 บัส โดยมีการจำลองดังต่อไปนี้

1. จำลองให้เกิดความคับคั่งแล้วมีการจัดการความคับคั่งโดยการอาศัยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิต
2. จำลองให้เกิดความคับคั่งแล้วมีการจัดการความคับคั่งโดยการอาศัยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและลดการใช้งานของโหลด
3. จำลองให้เกิดความคับคั่งแล้วมีการจัดการความคับคั่งโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตและลดการใช้งานของโหลดรวมถึงอาศัยการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของคู่สัญญาที่ได้ทำการตกลงกันไว้ระหว่างผู้ผลิตและลูกค้าในกรณีที่เกิดความคับคั่งขึ้น

ผลจากการจำลองพบว่าในกรณีมีการจัดสรรโดยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตอย่างเดียวสามารถแก้ปัญหาความคับคั่งของระบบได้ แต่อย่างก็ตามในบางครั้งการแก้ปัญหาด้วยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตอย่างเดียวไม่สามารถแก้ปัญหาความคับคั่งได้จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนการใช้งานโหลด และถ้ามีจัดการความคับคั่งด้วยการทำสัญญากันระหว่างผู้ผลิตและโหลดก็ยิ่งทำให้โอกาสในการบรรเทาความคับคั่งของระบบมีมากขึ้นซึ่งจะส่งผลดีกับระบบทำให้ระบบมีความมั่นคงเพิ่มขึ้น

สำหรับการจำลองการทำงานในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ประกอบไปด้วยราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต, ราคาที่พอใจในการเปลี่ยนแปลงการใช้โหลด และราคาที่สะท้อนในเรื่องของกำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งพบว่าเมื่อนำราคาในส่วนนี้มาพิจารณาด้วยทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบลดลง ดังนั้นเมื่อผู้จัดการสายส่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดก็หมายความว่าเจ้าของสายส่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้ การที่ผู้จัดการสายส่งสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบสายส่งได้นั้นส่งผลทำให้ระบบจะสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นรวมถึงในการนำเสนอยังมีเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นของน้ำหนักเพื่อให้ความสำคัญเรื่องกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตเพื่อแก้ไขปัญหาความคับคั่ง

จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเกิดความคับคั่งขึ้นสามารถจัดการโดยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิต, การลดโหลด, และการทำสัญญาระหว่างผู้ผลิตและโหลดในการบรรเทาความคับคั่ง
2. การจัดสรรการเปลี่ยนแปลงถ้ามีการเพิ่มในส่วนของราคาเทียมซึ่งเป็นราคาของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเข้าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะส่งผลทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง
3. การที่จะสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดจำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือกับทุกฝ่ายอย่างจริงใจในการส่งต้นทุนในการเปลี่ยนแปลงทั้งในส่วนของการผลิตและการใช้งาน ซึ่งถ้าเกิดเจ้าของระบบเป็นเจ้าของสายส่งและมีส่วนในการจัดการการผลิตด้วยก็จะทำให้เกิดผลประโยชน์มากที่สุดกับระบบเพราะว่าในการจัดสรรโอกาสที่จะทราบข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการจัดสรรมีมากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการนำปัญหาของเรื่องความมั่นคงของระบบ (Security) มาพิจารณาร่วมด้วย เช่น การพิจาณาเรื่องความมั่นคงทางด้านแรงดัน
2. ควรมีการนำอุปกรณ์พวก Flexible AC Transmission System : FACTs มาพิจารณาในการแก้ปัญหาความคับคั่งในสายส่งเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพจริง
3. ควรมีการพิจารณาการแก้ปัญหาความคับคั่งตั้งแต่เริ่มวางแผนการจ่ายไฟฟ้า เพราะในส่วนของวิทยานิพนธ์จะพิจารณาเฉพาะการแก้ปัญหาความคับคั่งในช่วงเวลาจริงเท่านั้น
4. กลไกซื้อขายไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการจำลองกลไกการซื้อขายซึ่งหากต้องการให้ผลการจำลองใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนการซื้อขายให้มีความซับซ้อนมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. S. N. Singh , A. K. David. Dynamic Security Constrained Congestion Management in Competitive Electricity Markets. Power Engineering Society Winter Meeting 3 (January 2000): 1808 - 1813
2. L. Jiansheng. Congestion Management for Generation scheduling in a Deregulation Chinese Power System. Power Engineering Society Winter Meeting 2 (Februry 2001): 1262 – 1265
3. N. H. Dandachi, M. J. Rawlins, O. Alsac, M. Paris, B. Stott. OPF for Reactive Pricing Studies on the NGC System. IEEE Trans. Power Syst. 11 (February 1996): 226-232
4. X. Wang, Y. H. Song. Apply Lagrangian Relaxation to Multi-Zone Congestion Management. Power Engineering Society Winter Meeting 2 (February 2001): 399 – 404
5. S. Phichaisawat. Reactive Power Management under Voltage Security Constraints PhD. Thesis, Brunel University, UK, September 2002
6. J. W. Lamont, R. Fu. Cost Analysis of Reactive Power Support. IEEE Trans. Power Syst. 14 (August 1999): 890-898
7. K.Thilo. Evaluation of Transmission Pricing Methods for Liberalized Markets A Literature Survey. EEH - Power Systems Laboratory July 2003
8. K.Thilo. Congestion Management in Liberalized Electricity Markets. EEH - Power Systems Laboratory May 2005
9. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าและการจะตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า. พฤศจิกายน 2543
10. EGAT, "EGAT Annual Report 2004", [available online] http://pr.egat.co.th/prweb/new/generation.htm
11. M.Victor , N. Andres. Reactive Power Pricing in Competitive Electric markets using the Transmission Losses Function. IEEE Porto Power Tech Proceedings 1 (September 2001)
12. X. Wang, Y. H. Song. Advanced Real-time Congestion Management Through Both Pool Balancing Market and Bilateral Market. Power Engineering Review 20 (February 2000): 47–49
13. R. D. Zimmerman and D. Gan. MATPOWER User's Manual: Version 3.0. Power Systems Engineering Reseach Center (PSERC). School of Electrical Engineering. Cornell University, 2005 (Available at http://www.pserc.cornell.edu./matpower/matpower.html).
14. F.Nils, D.Gerard. Experience With the Nord Pool Design and Implementation. IEEE Trans. Power Syst. 18 (May 2000): 541-547

15. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. วารสารนโยบายพลังงาน ฉบับที่ 54 ตุลาคม-ธันวาคม 2544

16. J.W.Bialek. A Proposal for transmission access regime under NETA. IEE Power System Management and Control 488 (April 2002): 47-51

17. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. วารสารนโยบายพลังงาน, ฉบับที่ 48 เมษายน-มิถุนายน 2543

18. Z. Alaywan, J. Allen. California electric restructuring: abroad description of the development of the California ISO. IEEE Trans. Power Syst. (November 1998): 1445–1452

19. T.Jianzhong. Overview of PJM Energy Market Design Operation and Experience. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation (April 2004): 24-27

20. F.Nils , D.Gerard. Experience with the Nord Pool Design and Implementation. IEEE Trans. Power Syst. 18 (May 2003): 541-547

21. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. วารสารนโยบายพลังงาน ฉบับที่ 49 กรกฎาคม-กันยายน 2543

22. นายสุรชัย ชัยทัศนีย์. การคิดราคาในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544

23. นายพัฒนะ พงศ์จริยา. การประยุกต์ใช้เจนเนติกอันกอริทึมในการจำลองตลาดซื้อขายไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545

24. Stephen G. Nash and Ariela Sofer. Linear and Nonlinear Programming. McGraw - Hill Internation Editions. 1996

25. Allen J.Wood , Bruce F.Wollenberg. Power Generation Operation and Control. John Wiley & Sons. Inc. 1996

26. Y.Chitra , Wei J.Lee. Transmission Congestion Management during Transition Period of Electricity Deregulation in Thailand. IEEE Trans. Power Syst. Nov. 2005: 1445–1452

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

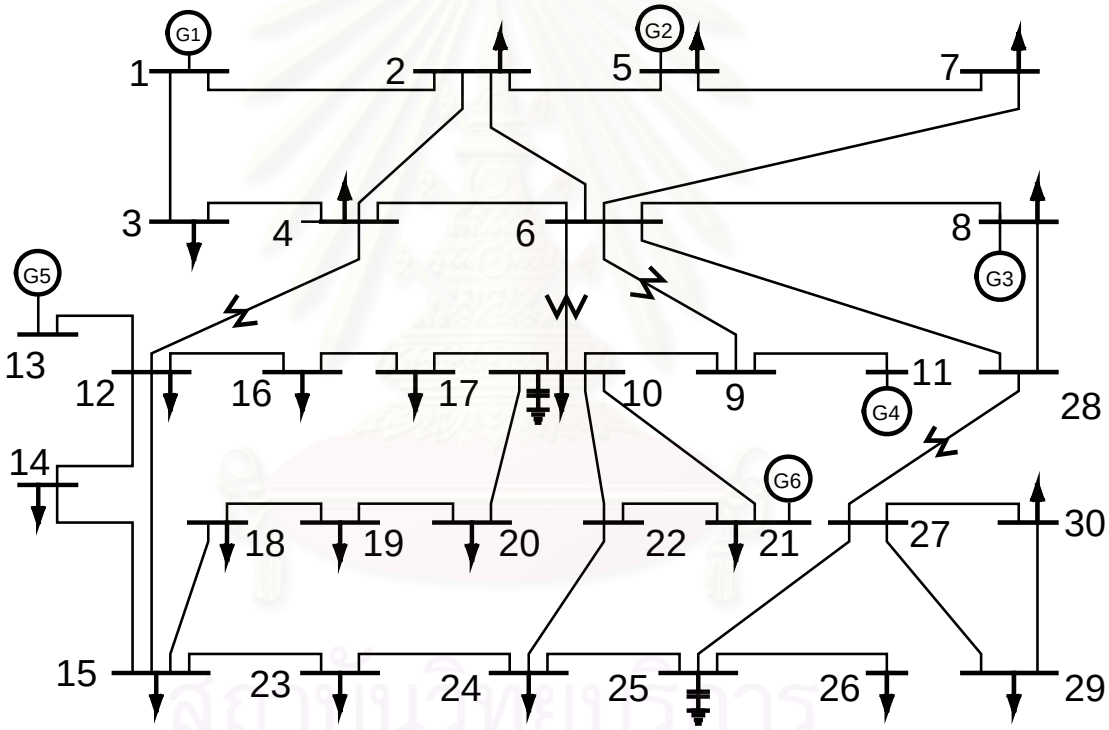
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ระบบทดสอบ

ภาคผนวก ก นี้แสดงข้อมูลของระบบทดสอบมาตรฐาน 30 บัส โดยที่ข้อมูลบางส่วนถูกดัดแปลงให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ MATPOWER ซึ่งพัฒนาโดย Power System Engineering Research Center (PSERC), Cornell University

ก.1 ระบบทดสอบขนาด 30 บัส



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 30 บัส

Bus No.	Bus type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area No.	Vm	Va	BaseKV	Zone	Vmax	Vmin
1	3	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
2	1	21.7	12.7	0	0.00	1	1	0	135	1	1.10	0.95
3	1	2.4	1.2	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
5	2	94.2	19.0	0	0.19	1	1	0	135	1	1.05	0.95
6	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
8	2	30.0	30.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
9	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
10	1	5.8	2.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
11	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
13	2	0.0	0.0	0	0.00	1	2	0	135	1	1.10	0.95
14	1	6.2	1.6	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
15	1	8.2	2.5	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
17	1	9.0	5.8	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
18	1	3.2	0.9	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
21	2	17.5	11.2	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
22	1	0.0	0.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.10	0.95
23	1	3.2	1.6	0	0.00	1	2	0	135	1	1.10	0.95
24	1	8.7	6.7	0	0.04	1	3	0	135	1	1.05	0.95
25	1	0.0	0.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95

Bus No.	Bus type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area No.	Vm	Va	BaseKV	Zone	Vmax	Vmin
26	1	3.5	2.3	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
27	1	0.0	0.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.10	0.95
28	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
29	1	2.4	0.9	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
30	1	10.6	1.9	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบ IEEE 30 บัส

Bus from	Bus To	r	x	b	rate	TR ratio	TR angle	Br Status
1	2	0.02	0.06	0.03	65	0	0	1
1	3	0.05	0.17	0.02	25	0	0	1
2	4	0.06	0.17	0.02	25	0	0	1
3	4	0.01	0.04	0.00	65	0	0	1
2	5	0.05	0.20	0.02	45	0	0	1
2	6	0.06	0.18	0.02	65	0	0	1
4	6	0.01	0.04	0.00	50	0	0	1
5	7	0.05	0.12	0.01	25	0	0	1
6	7	0.03	0.08	0.01	40	0	0	1
6	8	0.01	0.04	0.00	16	0	0	1
6	9	0.00	0.21	0.00	16	0	0	1
6	10	0.00	0.56	0.00	16	0	0	1
9	11	0.00	0.21	0.00	50	0	0	1
9	10	0.00	0.11	0.00	40	0	0	1
4	12	0.00	0.26	0.00	40	0	0	1
12	13	0.00	0.14	0.00	40	0	0	1

Bus from	Bus To	r	x	b	rate	TR ratio	TR angle	Br Status
12	14	0.12	0.26	0.00	32	0	0	1
12	15	0.07	0.13	0.00	25	0	0	1
12	16	0.09	0.20	0.00	16	0	0	1
14	15	0.22	0.20	0.00	16	0	0	1
16	17	0.05	0.19	0.00	16	0	0	1
15	18	0.11	0.22	0.00	16	0	0	1
18	19	0.06	0.13	0.00	16	0	0	1
19	20	0.03	0.07	0.00	16	0	0	1
10	20	0.09	0.21	0.00	16	0	0	1
10	17	0.03	0.08	0.00	16	0	0	1
10	21	0.03	0.07	0.00	25	0	0	1
10	22	0.07	0.15	0.00	16	0	0	1
21	22	0.01	0.02	0.00	16	0	0	1
15	23	0.10	0.20	0.00	16	0	0	1
22	24	0.12	0.18	0.00	16	0	0	1
23	24	0.13	0.27	0.00	16	0	0	1
24	25	0.19	0.33	0.00	16	0	0	1
25	26	0.25	0.38	0.00	16	0	0	1
25	27	0.11	0.21	0.00	16	0	0	1
28	27	0.00	0.40	0.00	25	0	0	1
27	29	0.22	0.42	0.00	16	0	0	1
27	30	0.32	0.60	0.00	16	0	0	1
29	30	0.24	0.45	0.00	16	0	0	1
8	28	0.06	0.20	0.02	16	0	0	1
6	28	0.02	0.06	0.01	16	0	0	1

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 บัส

bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	status	Pmax	Pmin
1	23.54	0	150	-20	1	100	1	100	0
5	37	0	44.7	-15	1	100	1	75	0
8	21.59	0	62.5	-15	1	100	1	75	0
11	19.2	0	40	-10	1	100	1	50	0
13	26.91	0	48.7	-15	1	100	1	50	0
21	60.97	0	60	-20	1	100	1	50	0

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลราคาการเปลี่ยนแปลงการผลิตไฟฟ้าของเครื่องไฟฟ้าในระบบ IEEE 30 บัส

Gen No.	C2	C1	C0
PG1	0.8	0.02	0
PG2	0.775	0.0175	0
PG3	0.85	0.03	0
PG4	0.625	0.05	0
PG5	0.65	0.03	0
PG6	0.83	0.0325	0
QG1	0.002	0	0
QG2	0.00175	0	0
QG3	0.0025	0	0
QG4	0.00625	0	0
QG5	0.0025	0	0
QG6	0.00083	0	0

ภาคผนวก ข

ระบบทดสอบ

ภาคผนวก ข เป็นการดัดแปลงข้อมูลของภาคผนวก ก เพื่อจำลองให้มีโครงสร้างของลักษณะข้อมูลให้คล้ายกับระบบส่งในประเทศไทย โดยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1, 2, 3 เป็นของ บริษัท กฟผ. จำกัด (มหาชน), เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 4 และ5 เป็นของ IPPs และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 6 เป็นของ SPPs และมี บริษัท กฟผ. จำกัด (มหาชน) เป็นเจ้าของสายส่ง โดยมีข้อมูลต่างๆดังต่อไปนี้

1. มีการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวในกรณีเกิดความคับคั่ง
2. มีการทำสัญญาซื้อขายกันแบบคู่สัญญาระหว่าง บริษัท กฟผ. จำกัด (มหาชน) (G1) กับลูกค้าที่บัส 2 และระหว่าง IPPs (G5) กับลูกค้าที่บัส 12 ที่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังการใช้งานของโหลดและกำลังการผลิตเพื่อช่วยเหลือในกรณีทีเกิดความคับคั่ง
3. มีโหลดที่สามารถปรับกำลังการใช้งานได้ ซึ่งจำลองให้โหลดที่บัส 15, 24 และ 30 สามารถปรับเปลี่ยนการลดโหลดเพื่อบรรเทาปัญหาความคับคั่ง

ตารางที่ ข.1 ต้นทุนการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องไฟฟ้าในระบบ IEEE 30 บัส

Gen No.	C2	C1	C0
PG1	0.8	0.02	0
PG2	0.775	0.0175	0
PG3	0.85	0.03	0
PG4	0.625	0.05	0
PG5	0.65	0.03	0
PG6	0.83	0.0325	0
QG1	0.002	0	0
QG2	0.00175	0	0
QG3	0.0025	0	0
QG4	0.00625	0	0
QG5	0.0025	0	0
QG6	0.00083	0	0

ตารางที่ ข.2 ต้นทุนการเปลี่ยนแปลงกำลังการใช้งานของโหลดที่สามารถช่วยเหลือระบบได้

Load No.	**C2**	**C1**	**C0**
Pload15	0.93	0.0325	0
Pload24	0.93	0.0325	0
Pload30	0.93	0.0325	0

ตารางที่ ข.3 ต้นทุนการเปลี่ยนแปลงกำลังการใช้งานของโหลดในระบบ IEEE 30 บัส

Gen No.	**C2**	**C1**	**C0**
PG1	0.8	0.02	0
PG5	0.65	0.03	0
QG1	0.002	0	0
QG5	0.0025	0	0
Pload 2	0.83	0.0325	0
Pload12	0.83	0.0325	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 30 บัส

Bus No.	Bus type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area No.	Vm	Va	BaseKV	Zone	Vmax	Vmin
1	3	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
2	1	21.7	12.7	0	0.00	1	1	0	135	1	1.10	0.95
3	1	2.4	1.2	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
5	2	94.2	19.0	0	0.19	1	1	0	135	1	1.05	0.95
6	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
8	2	30.0	30.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
9	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
10	1	5.8	2.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
11	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
13	2	0.0	0.0	0	0.00	1	2	0	135	1	1.10	0.95
14	1	6.2	1.6	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
15	1	8.2	2.5	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
17	1	9.0	5.8	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
18	1	3.2	0.9	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	0	0.00	1	2	0	135	1	1.05	0.95
21	2	17.5	11.2	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
22	1	0.0	0.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.10	0.95
23	1	3.2	1.6	0	0.00	1	2	0	135	1	1.10	0.95
24	1	8.7	6.7	0	0.04	1	3	0	135	1	1.05	0.95
25	1	0.0	0.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95

Bus No.	Bus type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area No.	Vm	Va	BaseKV	Zone	Vmax	Vmin
26	1	3.5	2.3	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
27	1	0.0	0.0	0	0.00	1	3	0	135	1	1.10	0.95
28	1	0.0	0.0	0	0.00	1	1	0	135	1	1.05	0.95
29	1	2.4	0.9	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95
30	1	10.6	1.9	0	0.00	1	3	0	135	1	1.05	0.95

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลสายส่งของระบบ IEEE 30 บัส

Bus from	Bus To	r	x	b	rate	TR ratio	TR angle	Br Status
1	2	0.02	0.06	0.03	61.75	0	0	1
1	3	0.05	0.17	0.02	23.75	0	0	1
2	4	0.06	0.17	0.02	23.75	0	0	1
3	4	0.01	0.04	0.00	61.75	0	0	1
2	5	0.05	0.20	0.02	42.75	0	0	1
2	6	0.06	0.18	0.02	61.75	0	0	1
4	6	0.01	0.04	0.00	47.5	0	0	1
5	7	0.05	0.12	0.01	23.75	0	0	1
6	7	0.03	0.08	0.01	38	0	0	1
6	8	0.01	0.04	0.00	14.4	0	0	1
6	9	0.00	0.21	0.00	14.4	0	0	1
6	10	0.00	0.56	0.00	15.2	0	0	1
9	11	0.00	0.21	0.00	47.5	0	0	1
9	10	0.00	0.11	0.00	38	0	0	1
4	12	0.00	0.26	0.00	38	0	0	1
12	13	0.00	0.14	0.00	36	0	0	1

Bus from	Bus To	r	x	b	rate	TR ratio	TR angle	Br Status
12	14	0.12	0.26	0.00	30.4	0	0	1
12	15	0.07	0.13	0.00	23.75	0	0	1
12	16	0.09	0.20	0.00	15.2	0	0	1
14	15	0.22	0.20	0.00	15.2	0	0	1
16	17	0.05	0.19	0.00	15.2	0	0	1
15	18	0.11	0.22	0.00	15.2	0	0	1
18	19	0.06	0.13	0.00	15.2	0	0	1
19	20	0.03	0.07	0.00	15.2	0	0	1
10	20	0.09	0.21	0.00	15.2	0	0	1
10	17	0.03	0.08	0.00	15.2	0	0	1
10	21	0.03	0.07	0.00	23.75	0	0	1
10	22	0.07	0.15	0.00	15.2	0	0	1
21	22	0.01	0.02	0.00	15.2	0	0	1
15	23	0.10	0.20	0.00	15.2	0	0	1
22	24	0.12	0.18	0.00	15.2	0	0	1
23	24	0.13	0.27	0.00	15.2	0	0	1
24	25	0.19	0.33	0.00	15.2	0	0	1
25	26	0.25	0.38	0.00	15.2	0	0	1
25	27	0.11	0.21	0.00	15.2	0	0	1
28	27	0.00	0.40	0.00	23.75	0	0	1
27	29	0.22	0.42	0.00	15.2	0	0	1
27	30	0.32	0.60	0.00	15.2	0	0	1
29	30	0.24	0.45	0.00	15.2	0	0	1
8	28	0.06	0.20	0.02	15.2	0	0	1
6	28	0.02	0.06	0.01	15.2	0	0	1

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 บัส

bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	status	Pmax	Pmin
1	23.54	0	150	-20	1	100	1	100	0
5	37	0	44.7	-15	1	100	1	75	0
8	21.59	0	62.5	-15	1	100	1	65	0
11	19.2	0	40	-10	1	100	1	65	0
13	26.91	0	48.7	-15	1	100	1	55	0
21	60.97	0	60	-20	1	100	1	40	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อุทัย ดีปินตา เกิดวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2546 จากนั้นได้เข้าทำการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย