

การคำนวณราคาไฟฟ้าแบบสปอตในธุรกิจไฟฟ้า

SPOT PRICING OF ELECTRICITY IN
COMPETITIVE MARKET

สุนทร ฝ้ายหมื่นไวย
SUNTHORN FAIMUENWAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-692-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การคำนวณราคาไฟฟ้าแบบสปอตในธุรกิจไฟฟ้า

SPOT PRICING OF ELECTRICITY IN
COMPETITIVE MARKET



สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์
SUNTHORN FAIMUENWAI

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 47610
วัน, เดือน, ปี 1 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-692-4

**SPOT PRICING OF ELECTRICITY IN
COMPETITIVE MARKET**

SUNTHORN FAIMUENWAI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-692-4

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณราคาไฟฟ้าแบบสปอตในธุรกิจไฟฟ้า
นักศึกษา	นายสุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์
รหัสประจำตัว	42061082
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ศุภี บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการคำนวณราคาไฟฟ้าแบบสปอตในธุรกิจไฟฟ้าที่สามารถพิจารณาเป็นปัญหาที่ขยายผลจากออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ และด้วยพจน์ของความหมายทางเศรษฐศาสตร์ ตัวคุณลากรองจ์ของสมการข้อกำหนดจะเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการคำนวณราคาไฟฟ้า สำหรับการคำนวณได้ใช้โปรแกรมเชิงเส้นโดยใช้เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบของ IEEE ได้นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา โดยตัวอย่างต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และในตอนท้าย ได้เสนอแนวทางเพื่อการปรับลดราคาไฟฟ้าแบบสปอตด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) บนสายส่งไฟฟ้าที่มีความคับคั่ง และเนื่องจากราคาไฟฟ้าแบบสปอตที่มีความแตกต่างกัน จึงเลือกระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus เป็นกรณีศึกษา สำหรับการปรับลดราคา ผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงการปรับตัวลดลงของราคาและความแตกต่างของราคาไฟฟ้าสปอตบนสายส่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ในขณะเดียวกันความสูญเสียของระบบและต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้านี้ก็ลดลงด้วย

Thesis Title	Spot Pricing of Electricity in Competitive Market
Student	Mr. Sunthorn Faimuenwai
Student ID.	42061082
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Sulee Bunjongjit

ABSTRACT

In this thesis the spot pricing of electricity in competitive electricity market as an extended Optimal Power Flow is presented. In the context of the economic interpretation, LaGrange multipliers, associated with the equality constraints, can play an important role in this pricing. The technique of predictor-corrector primal-dual interior point enhanced linear programming is employed in that progress. IEEE test systems are then used as the case study, while the generation costs are all provided from the Electric Power System Control Center, the Electricity Generating Authority of Thailand. Finally the spot price reductions using Thyristor-Controlled Series Capacitor embedded on the transmission line is proposed. Due to the various price of IEEE 30 Bus it is selected as the case study for this reduction. The numerical results show that the spot prices and the price differences across the TCSC-embedded lines are reduced, meanwhile a slight decrease in total generation cost and system loss are also obtained.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าขอประณตน์อ้อมสักการ บูรพคณาจารย์ ผู้กอปรประโยชน์ศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาที่ข้าพเจ้าถือว่าแล้วเสร็จมาเป็นเวลานาน แต่มีเหตุให้จำต้องล่าช้าจนกระทั่งต้องรีบปิดเล่มในเดือนเมษายน 2546 ตลอดเวลาข้าพเจ้าได้ตระหนักถึงความอุปการะคุณของบุคคลดังรายนามด้านล่างนี้ที่ควรอย่างยิ่งสำหรับคำขอบคุณ ขอบพระคุณ และกราบขอบพระคุณ

รองศาสตราจารย์นิทัศน์ กฤษณจินดา ปฐมอาจารย์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.

รองศาสตราจารย์ศุภี บรรจงจิตร ดร.วิไลพร วรจิตตานนท์ ผศ.ดร.เลิศลักษณ์ กลิ่นหอม รศ.ดร.กัญญา ตันติวิสุทธิกุล ผศ.รณณีย์ อาภาภิรมย์ รศ.ดร.ถนิมนันต์ เจนอักษร คุณกิตติอนุศิษฏ์วิวัฒน์ ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร ผศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร คุณพุทธพร พลารักษ์ คุณวิมลแข วงษ์ละสิน คุณวิทยา พงศ์วิสุทธิวิช คุณบุญนาถ อาทิตย์ เจ้าหน้าที่บุคลากรของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เกี่ยวข้อง คุณประภาศรี สนธยางกุล เพื่อนฝูงอันประกอบด้วย วุฒิกิร อรรถพล นันทนาฎ สุรัตน์ อุดม จิราพร นิธิวัฒน์ และเจษฎา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนทางการเงินจากโครงการทุนบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ (Local Graduate Scholarship) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกขอบคุณเป็นอย่างที่สุด

ขอบคุณคุณปู่คุณย่าที่นำพระศาสนาเข้ามาในชีวิตของข้าพเจ้า ขอบคุณพี่ทั้งสามคนที่ทำให้ข้าพเจ้ามีครอบครัวที่อบอุ่นสมบูรณ์ และท้ายสุดแต่สำคัญที่สุด ขอบพระคุณบิดามารดาผู้ให้ชีวิต ให้โอกาส ให้การศึกษา และสอนสั่งให้ข้าพเจ้ารู้จักแยกแยะผิดชอบชั่วดีที่ได้ใช้ประโยชน์มาจนถึงปัจจุบัน

สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์

เมษายน 2546

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ราคาตลาดของไฟฟ้าและออปติมอลพาวเวอร์โพล์.....	1
1.3 โปรแกรมเชิงเส้นและเทคนิค PCPDIP.....	2
1.4 อุปกรณ์ Flexible AC Transmission System (FACTS).....	2
1.5 ความมุ่งหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 กิจการไฟฟ้า	5
2.1 ความเป็นมา	5
2.2 โครงสร้างกิจการไฟฟ้าในลักษณะแข่งขัน	6
2.2.1 ภาคการผลิต	6
2.2.2 ภาคการจัดส่ง	7
2.2.3 ภาคการจัดจำหน่าย	8
2.3 การค้าของตลาดขายส่งไฟฟ้า	9
2.3.1 ประเภทของสัญญาในตลาดขายส่ง	9
2.3.2 สัญญาการซื้อขายแบบล่วงหน้า	10
2.3.3 สัญญาการซื้อขายระยะสั้น	11
2.3.4 สัญญาการซื้อขายแบบสองฝ่าย	12
2.3.5 สัญญาการจ่ายส่วนต่าง	12
2.4 ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า	13
2.4.1 คำจำกัดความ	13
2.4.2 โครงสร้างของตลาดกลาง	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	กลไกการซื้อขายภายในตลาดกลาง	14
2.5	สรุป	16
บทที่ 3	การคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า	17
3.1	ความเป็นมา	17
3.2	ราคาค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการไฟฟ้าในลักษณะแข่งขัน	18
3.2.1	หลักการกำหนดราคาค่าไฟฟ้า	18
3.2.2	ค่าการเปลี่ยนเข้าสู่ระบบที่มีการแข่งขัน	19
3.2.3	ค่าบริการจัดหาไฟฟ้า	19
3.2.4	ค่าบริการสายส่งและสายจำหน่าย	19
3.2.5	ราคาตลาดของไฟฟ้า	20
3.3	ราคาตลาดของไฟฟ้า	20
3.3.1	คำจำกัดความ	20
3.3.2	องค์ประกอบของราคาตลาด	21
3.3.3	การตอบสนองต่อสภาวะตลาด	22
3.4	ออปติมอลพาวเวอร์โพล์	23
3.4.1	คำจำกัดความ	23
3.4.2	เงื่อนไขของความออปติมอล	23
3.4.3	การจำแนกประเภทตัวแปร	24
3.4.4	ขีดจำกัดสำหรับการดำเนินการ	25
3.4.5	สมการข้อกำหนด	25
3.4.6	อสมการข้อกำหนด	25
3.4.7	ฟังก์ชันเป้าหมาย	26
3.5	การหาผลเฉลยของออปติมอลพาวเวอร์โพล์	28
3.5.1	ลำดับการคำนวณ	28
3.5.2	รายละเอียดสำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรมเชิงเส้น	28
3.6	สรุป	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4	เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point สำหรับโปรแกรมเชิงเส้น.....	31
4.1	ความเป็นมาและความสำคัญ.....	31
4.2	Primal Problem และ Dual Problem	33
4.3	ฟังก์ชันลากรองเจียนและการกำหนด Newton Direction.....	34
4.4	เทคนิค Predictor - Corrector	35
4.5	สรุป.....	37
บทที่ 5	การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า.....	38
5.1	ความสำคัญ.....	38
5.2	Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)	39
5.3	การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้า.....	43
5.3.1	ความสามารถในการรับภาระของสายส่งไฟฟ้า.....	43
5.3.2	แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้า	45
5.4	ความต่างของราคาตลาดบนสายส่งไฟฟ้า.....	46
5.5	สรุป.....	48
บทที่ 6	ผลการทดลอง.....	49
6.1	บทนำ	49
6.2	การทดสอบโปรแกรม	50
6.3	กรณีศึกษา การคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า.....	56
6.3.1	ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 Bus	56
6.3.2	ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 Bus	59
6.3.3	ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus	62
6.3.4	ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 Bus	65
6.3.5	ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 Bus	68
6.4	ความสามารถของเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point	71
6.5	กรณีศึกษา การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 9 BUS.....	72
6.6	กรณีศึกษา การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 BUS.....	76
6.7	กรณีศึกษา การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 BUS.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 บทสรุป.....	87
7.1 สรุปเนื้อหา.....	87
7.2 สรุปผลการทดสอบ.....	88
7.3 คำแนะนำสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก ก รายละเอียดระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS	95
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	100
ประวัติผู้เขียน	128

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาคการผลิตกำลังไฟฟ้า.....	6
2.2 ภาคการจัดส่งกำลังไฟฟ้า.....	7
2.3 ภาคการจัดจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	8
2.4 การค้าภายในตลาดขายส่งไฟฟ้า.....	9
2.5 การกำหนดราคากลาง (ต้นทุนหน่วยสุดท้าย) ด้วยกลไกการประมูลในตลาดล่วงหน้า.....	10
2.6 การกำหนดราคาซื้อขายในตลาดระยะสั้น.....	11
2.7 โครงสร้างของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับภาคการผลิตและการจำหน่าย.....	14
3.1 โครงสร้างของราคาค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการไฟฟ้าภายใต้โครงสร้างที่มีการแข่งขัน.....	18
3.2 ราคากลางที่ตอบสนองภาวะอุปสงค์และอุปทานทางไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	22
3.3 ลำดับขั้นตอนการหาผลเฉลยของปัญหาออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ รูปแบบ Class A	30
4.1 การเดินทางเข้าสู่จุดออปติมอลของเทคนิค Interior point และ Simplex	32
4.2 ขั้นตอนการหาผลเฉลยด้วยเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point.....	37
5.1 โมดูลของอุปกรณ์ TCSC ต่อเฟส.....	39
5.2 ลักษณะสมบัติของ X_{TCSC} / X_C ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามมุม Firing angle ของ Thyristor ใน อุปกรณ์ TCR	40
5.3 ลักษณะสมบัติของ X_{TCSC} / X_C ที่เปลี่ยนแปลงตามกระแสในสภาวะคงตัว.....	40
5.4 โครงร่างของอุปกรณ์ TCSC	41
5.5 คุณลักษณะของอุปกรณ์ TCSC ระหว่าง $X - I$ โดยพิจารณาการเพิ่มจำนวนโมดูล	42
5.6 กราฟ Power angle และขอบเขตของเสถียรภาพสำหรับสภาวะคงตัว.....	43
5.7 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าที่แทนด้วยวงจรสมมูลย์ π	45
6.1 ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9 Bus สำหรับการทดสอบความถูกต้อง.....	49
6.2 ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 14 Bus สำหรับการทดสอบความถูกต้อง.....	52
6.3 ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 Bus สำหรับการทดสอบความถูกต้อง.....	55
6.4 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 Bus	56
6.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 Bus	57
6.6 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 Bus	57
6.7 ราคาสถาของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 Bus	58
6.8 ความต่างของราคาสถาของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 Bus	58
6.9 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 Bus	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 Bus	60
6.11 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 Bus	60
6.12 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 Bus	61
6.13 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 Bus	61
6.14 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus	62
6.15 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus	63
6.16 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus	63
6.17 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus	64
6.18 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus	64
6.19 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 Bus	65
6.20 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 Bus	66
6.21 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 Bus	66
6.22 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 Bus	67
6.23 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 Bus	67
6.24 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 Bus	68
6.25 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 Bus	69
6.26 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 Bus	69
6.27 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 Bus	70
6.28 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 Bus	70
6.29 จำนวนรอบการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า	71
6.30 Sensitivity of line 3 flow to the series compensation (IEEE 9 BUS)	72
6.31 เปรียบเทียบราคาตลาดของระบบ ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 9 BUS)	73
6.32 เปรียบเทียบความต่างของราคา ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 9 BUS)	74
6.33 Sensitivity of line 6 flow to the series compensation (IEEE 14 BUS)	76
6.34 เปรียบเทียบราคาตลาดของระบบ ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 14 BUS)	77
6.35 เปรียบเทียบความต่างของราคา ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 14 BUS)	78
6.36 Sensitivity of line 10 flow to the series compensation (IEEE 30 BUS)	80
6.37 Sensitivity of line 35 flow to the series compensation (IEEE 30 BUS)	81
6.38 Sensitivity of line 40 flow to the series compensation (IEEE 30 BUS)	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.39 ราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 BUS ก่อนและหลังการชดเชย 40 %	82
6.40 ราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 BUS หลังการชดเชย 50 และ 60 %	83
6.41 ความแตกต่างของราคาตลาด ระบบ IEEE 30 BUS ก่อนและหลังการชดเชย 40 %	84
6.42 ความแตกต่างของราคาตลาด ระบบ IEEE 30 BUS หลังการชดเชย 50 และ 60 %	85
ก.1 การจัดวางโครงข่ายของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 Bus.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การกำหนดราคากลาง (ต้นทุนการผลิตหน่วยสุดท้าย) สำหรับการซื้อขายระยะสั้น.....	11
6.1 การผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 9 BUS	50
6.2 ราคาลาดของไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 9 BUS	50
6.3 การผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 14 BUS	51
6.4 ราคาลาดของไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 14 BUS	51
6.5 การผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 BUS	53
6.6 ราคาลาดของไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 BUS	53
6.6 ราคาลาดของไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 BUS (ต่อ)	54
6.7 ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้สำหรับการคำนวณ.....	71
6.8 ผลการทดลองปรับลดราคาลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 9 BUS.....	75
6.9 ผลการทดลองปรับลดราคาลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 14 BUS.....	79
6.10 ผลการทดลองปรับลดราคาลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 BUS.....	86
ก.1 ข้อมูลับสของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS	97
ก.1 ข้อมูลับสของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS (ต่อ)	98
ก.2 ข้อมูลเส้นทางสายส่งของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS.....	98
ก.2 ข้อมูลเส้นทางสายส่งของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS (ต่อ).....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกิจการไฟฟ้าได้เริ่มครั้งแรกในทศวรรษที่ 1980 เป็นต้นมา โดยเริ่มที่สหราชอาณาจักร กลุ่มประเทศลาตินอเมริกา กลุ่มประเทศยุโรปตอนกลางและตะวันออก ประเทศออสเตรเลีย ประเทศนอร์เวย์และประเทศสวีเดน [1-6] และในปี ค.ศ. 1996 สหรัฐอเมริกา ได้ออกกฎหมายเพื่อควบคุมกิจการพลังงานซึ่งรวมถึงกิจการไฟฟ้าด้วย [7] สำหรับประเทศไทย ตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 5 มีนาคม พ.ศ. 2539 เห็นชอบตามมติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) เรื่องแนวทางในการปรับโครงสร้างและแปรรูปกิจการไฟฟ้าของประเทศ ได้นำสู่การแปรรูปกิจการไฟฟ้า [8-10] ทั้งนี้ การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้ามีเป้าหมายหลักเพื่อให้เกิดการแข่งขันสำหรับการให้บริการ การระดมทุนจากภาคเอกชน การลดภาระหนี้สินของภาครัฐ และสนองความต้องการราคาไฟฟ้าที่สะท้อนสถานะที่แท้จริงทางเศรษฐศาสตร์ ถือเป็นแรงผลักดันสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลง กำลังไฟฟ้าได้รับการปฏิบัติเช่นเดียวกับสินค้าประเภทอื่นที่มีการซื้อขายผ่านสัญญาหลายรูปแบบภายใต้โครงสร้างกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขันซึ่งแตกต่างจากกิจการไฟฟ้าที่มีลักษณะผูกขาดโดยรัฐรูปแบบเดิม และสำหรับประเทศไทย ภาคเอกชนได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในกิจการไฟฟ้าบ้างแล้ว ในส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้า [11-13]

1.2 ราคาตลาดของไฟฟ้าและออปติมอลพาวเวอร์โพลว์

ความพยายามที่จะกำหนดราคาให้สะท้อนถึงต้นทุนที่แท้จริงสำหรับการผลิตและการจัดจำหน่ายกำลังไฟฟ้า วิธีการกำหนดราคาค่าไฟฟ้าหลายรูปแบบได้มีการนำมาใช้ [15] ไม่ว่าจะเป็น การกำหนดราคาตามอัตราสองส่วน การกำหนดราคาด้วยอัตราที่แตกต่างกันตามเวลาของวัน การกำหนดราคาด้วยอัตราที่แตกต่างกันตามเวลาของการใช้ไฟฟ้า และสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ สำหรับกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขันของประเทศไทย ราคาค่าไฟฟ้าได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังแสดงในรายงานความก้าวหน้าการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้า [10] ราคาตลาดของไฟฟ้าได้กลายเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดราคาค่าไฟฟ้า โดย ศาสตราจารย์ Fred C. Schweppe และคณะ [16] เป็นผู้ให้นิยามไว้ในปี ค.ศ. 1988 ว่าราคาตลาดของไฟฟ้าประกอบขึ้นจากราคา 3 ส่วน [17] และสามารถหาได้จากปัญหาขยายผลจากออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ [18] การหาจุดออปติมอล [19] ที่เรียกว่าออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ได้เข้ามามีบทบาทในงานทางด้านระบบกำลังไฟฟ้าเป็นอย่างมากโดยเริ่มจากทศวรรษที่ 1920 [20] วิธีการจำนวนมาก [21-25] ได้มีการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงให้การคำนวณดียิ่งขึ้น

1.3 โปรแกรมเชิงเส้นและเทคนิค PCPDIP

โปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบการคำนวณที่มีบทความวิชาการกล่าวถึงว่าเป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ [37] โดยที่มีการกล่าวถึงโปรแกรมเชิงเส้นครั้งแรกในทศวรรษที่ 1940 [26] การประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่เกี่ยวกับหลักการทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งมีระเบียบวิธี Simplex เป็นเครื่องมือเดียวในการหาผลเฉลย ในทศวรรษที่ 1960 [27-28] มีการนำโปรแกรมเชิงเส้นเข้ามาในงานระบบกำลังไฟฟ้าเป็นครั้งแรกสำหรับการกำหนดการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1984 Narendra Karmarkar [29] ได้เผยแพร่บทความเกี่ยวกับเทคนิค Interior Point ซึ่งมีความแตกต่างจากระเบียบวิธี Simplex โดยเป็นการหาจุดออปติมอลภายในขอบเขตของปัญหาเท่านั้น ในขณะที่ ระเบียบวิธี Simplex ถือว่าจุดออปติมอลอยู่บนเส้นขอบข้อกำหนดของปัญหา เทคนิค Interior Point ได้เข้ามาในงานระบบกำลังไฟฟ้าครั้งแรกในปลายทศวรรษที่ 1980 โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับด้านนี้มีออกมาอย่างต่อเนื่อง [30-35] James A. Mohmo และคณะ [36-37] ได้กล่าวถึงการพัฒนาระเบียบวิธีต่างๆ ในการแก้ปัญหาออปติมอลพาวเวอร์ฟลว์และชี้ให้เห็นข้อดีของโปรแกรมเชิงเส้นและเทคนิค Interior Point ด้วยเหตุที่ระยะเวลาการคำนวณส่วนใหญ่หมดไปกับการแก้สมการของ Karush-Kuhn-Tucker เทคนิค Predictor-Corrector [38-40] จึงมีการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหานี้ด้วยการลดรอบการคำนวณลงโดยที่ยังคงอยู่ภายในขอบเขตของปัญหา ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์มาก

1.4 อุปกรณ์ Flexible AC Transmission System (FACTS)

โดยพิจารณาจากหลักการทำงาน อุปกรณ์ FACTS สามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภท [43] ดังนี้

- **Static Shunt Compensator** : Static Var Compensator (SVC) และ Static Synchronous Compensator (STATCOM)
- **Static Series Compensator** : Thyristor-Switched Series Capacitor (TSSC) และ Static Synchronous Series Compensator (SSSC)
- **Static Voltage and Phase Angle Regulator** : Thyristor-Controlled Voltage and Phase Angle Regulator (TCVR และ TCPAR)
- **Combined Compensator** : Unified Power Flow Controller (UPFC) และ Inter Line Power Flow Controller (IPFC)

นอกจากนี้ยังมีประเภทที่วิจัยและพัฒนาเพื่องานเฉพาะอย่าง อาทิ อุปกรณ์ NGH-SSR และ Thyristor-Controlled Braking Resistor (TCBR) คุณค่าของอุปกรณ์ FACTS มีมากมายดังที่ได้อธิบายในบทความของ Ch. Schaffner และ G. Andersson [44] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้ามีการควบคุมที่เหมาะสม อุปกรณ์ FACTS จะเกิดคุณประโยชน์ต่อระบบกำลังไฟฟ้าอย่างมาก [45-46]

สำหรับกิจการไฟฟ้า ปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการส่งและความคับคั่งของสายส่งไฟฟ้า อาจแก้ไขได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS [47-50] โดยตำแหน่งในการติดตั้งสามารถพิจารณาจาก หลักการที่แตกต่างกันตามความวัตถุประสงค์สำคัญ ตัวอย่างเช่น เพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งไฟฟ้า หรือเพื่อลดความคับคั่งของสายส่งไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ TCSC ถือเป็นอุปกรณ์ FACTS ที่ได้รับความนิยม [50] และด้วยสาเหตุที่ความแตกต่างของราคาตลาดมีความหมายโดยนัยเท่ากับต้นทุนในการส่งกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในบทความของ Thomas W. Gedra [51] การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าที่มีความคับคั่งก็เป็นแนวทางหนึ่งในการปรับลดต้นทุนดังกล่าวด้วยเช่นกัน

1.5 ความมุ่งหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ด้วย รายงานการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าและการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า [10] กล่าวถึง ราคาไฟฟ้าแบบสปอตโดยใช้คำว่า ราคาตลาดของไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอใช้คำว่า ราคาตลาดของไฟฟ้า ด้วยเช่นกัน โดยมีวัตถุประสงค์ประกอบด้วย

- ศึกษาโครงสร้างกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขัน
- ศึกษาการค้าส่งไฟฟ้าและตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า
- ศึกษาโครงสร้างการคิดราคาค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการไฟฟ้าในขนาดของประเทศไทย
- ศึกษาจำกัดความและองค์ประกอบของราคาตลาดของไฟฟ้า
- ศึกษาการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้าด้วยออปติมอลพาวเวอร์โพลาร์โดยใช้โปรแกรมเชิงเส้น และเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point
- ศึกษาโมเดลการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC เข้าไปบนสายส่งไฟฟ้า
- เสนอแนวทางในการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือว่ากิจการไฟฟ้ารูปแบบแข่งขันมีลักษณะแบบ PoolCo Model [11] โดยมีกำลังไฟฟ้า (Active power) เป็นสินค้าหลักในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า และสิ่งอื่นไม่ว่าจะเป็น กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power) ความเสถียรภาพของทุกระบบ พลังงานสำรองทุกรูปแบบ การบริการข้อมูลการซื้อขายของตลาดกลาง ฯลฯ [11-13] ถือเป็นบริการเสริมที่ต้องอยู่ภายใต้การควบคุมของศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า ตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่องจะไม่นำเข้ามาพิจารณาในปัญหาของ ออปติมอลพาวเวอร์โพลาร์ [25] ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบของ IEEE [54] ได้นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา และถือว่าฟังก์ชันของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบเส้นโค้งกำลังสองที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นด้านเดียว [20-25] โดยตัวอย่างของต้นทุนได้รับความอนุเคราะห์จาก กองเทคโนโลยีศูนย์ควบคุม ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เรื่อง การคำนวณราคาไฟฟ้าแบบสปอตในธุรกิจไฟฟ้า ประกอบด้วยเนื้อหา 7 บท โดยมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมา ราคาตลาดของไฟฟ้า ออปติมอลพาวเวอร์โพล์ โปรแกรมเชิงเส้นและเทคนิค PCPDIP และอุปกรณ์ FACTS โดยสังเขป และตอนท้ายกล่าวถึงความมุ่งหมาย ขอบเขต และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กิจการไฟฟ้า กล่าวถึง ความเป็นมาของการแปรรูปกิจการไฟฟ้า โครงสร้างของกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขัน การค้าของตลาดขายส่งไฟฟ้า และตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

บทที่ 3 การคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า กล่าวถึง ความเป็นมาของราคาตลาดของไฟฟ้า โครงสร้างของราคาตลาด และออปติมอลพาวเวอร์โพล์

บทที่ 4 เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point สำหรับโปรแกรมเชิงเส้น กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของเทคนิคอันนี้ Primal และ Dual Problem ฟังก์ชันลากรองเจียนและการกำหนด Newton Direction และเทคนิค Predictor-Corrector

บทที่ 5 การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า กล่าวถึง ความสำคัญของการปรับลดราคา การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้า และการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า

บทที่ 6 ผลการทดสอบ แสดงการทดสอบโปรแกรมกับ Simulation Package [53] และกรณีศึกษา ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9, 14, 30, 57 และ 118 BUS และตอนท้ายแสดงการทดลองติดตั้งอุปกรณ์ TCSC เพื่อปรับลดราคาตลาดบนระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9,14 และ 30 BUS

บทที่ 7 สรุป สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ วิธีการและเทคนิคที่ใช้สำหรับการคำนวณ และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบกับกรณีศึกษา ผลการทดลองติดตั้งอุปกรณ์ TCSC และคำแนะนำสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวก ก แสดง รายละเอียดของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS

ภาคผนวก ข แสดง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทที่ 2

กิจการไฟฟ้า

2.1 ความเป็นมา

แนวโน้มของการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าได้เกิดขึ้นในหลายประเทศ โดยเริ่มครั้งแรกในทศวรรษที่ 1980 ณ สหราชอาณาจักร [1] และกลุ่มประเทศลาตินอเมริกา [2-3] และต่อมาในกลุ่มประเทศยุโรปตอนกลางและตะวันออก [4] หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1990 การไฟฟ้าทั้ง 4 แห่งของประเทศออสเตรเลียได้เชื่อมโยงกันและนำไปสู่การแปรรูปกิจการไฟฟ้าภายในประเทศ โดยตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าสามารถเปิดดำเนินการในเดือนมิถุนายน ปี ค.ศ. 1994 [5] เช่นกัน กิจการไฟฟ้าของประเทศนอร์เวย์ มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างในเดือนมิถุนายน ปี ค.ศ. 1990 โดยตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าสามารถดำเนินการซื้อขายในปี ค.ศ. 1992 ในขณะที่ประเทศสวีเดนทำการแปรรูปกิจการไฟฟ้าในประเทศของตนในปี ค.ศ. 1995 และเชื่อมโยงกับตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้านอร์เวย์ในปี ค.ศ. 1996 [6] และในปีเดียวกัน สหรัฐอเมริกาได้ออกกฎหมายเพื่อควบคุมกิจการพลังงานซึ่งรวมถึงกิจการไฟฟ้าด้วย [7] และสำหรับประเทศไทย ด้วยมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 5 มีนาคม พ.ศ. 2539 เห็นชอบตามมติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) เรื่องแนวทางในการปรับโครงสร้างและแปรรูปกิจการไฟฟ้าของประเทศ และได้มอบหมายให้สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) เป็นหน่วยงานรับผิดชอบ นอกจากนี้ คณะรัฐมนตรีมีมติเมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2541 เห็นชอบแผนแม่บทการปฏิรูปรัฐวิสาหกิจ ซึ่งใช้เป็นกรอบในการกำหนดขอบเขตและทิศทางการปรับโครงสร้างและการแปรรูปสาขารัฐกิจหลัก 4 สาขา ซึ่งรวมถึงสาขาพลังงานด้วย [8-10]

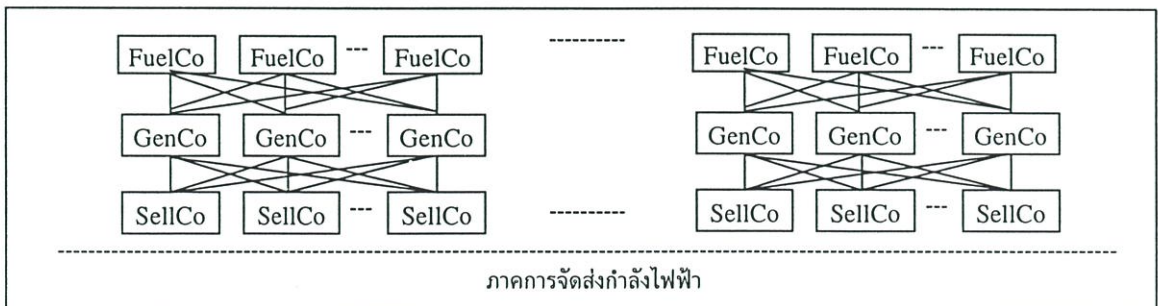
การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้ามีเป้าหมายหลักเพื่อให้เกิดการแข่งขันสำหรับการให้บริการการระดมทุนจากภาคเอกชน การลดภาระหนี้สินของภาครัฐ และสนองความต้องการราคาไฟฟ้าที่สะท้อนสถานะที่แท้จริงทางเศรษฐศาสตร์ ถือเป็นแรงผลักดันสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ โครงสร้างที่เหมาะสมของกิจการไฟฟ้ามีความแตกต่างกันในหลายประเทศ โดยขึ้นกับนโยบายของภาครัฐและสถานะทางเศรษฐกิจและสังคมเป็นสำคัญ ภาคการผลิต การจัดส่ง และการจัดจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจะถูกจำแนกออกจากกันอย่างชัดเจน โดยพิจารณากำลังไฟฟ้าเป็นเหมือนสินค้าประเภทหนึ่งที่มีการซื้อขายผ่านสัญญาหลายรูปแบบภายใต้โครงสร้างกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขันซึ่งแตกต่างจากกิจการไฟฟ้าที่มีลักษณะผูกขาดโดยรัฐรูปแบบเดิม ทั้งนี้ โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การแข่งขันที่เกิดขึ้นในกิจการไฟฟ้าจะนำมาซึ่งประโยชน์สำหรับผู้บริโภคซึ่งหมายถึงผู้ใช้ไฟฟ้านั่นเอง และสำหรับประเทศไทย ภาคเอกชนได้เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญในกิจการไฟฟ้าและแสดงบทบาทเพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ จากอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการผลิตไฟฟ้า ดังที่ทราบกันอยู่แล้ว [11-13]

2.2 โครงสร้างกิจการไฟฟ้าในลักษณะแข่งขัน

2.2.1 ภาคการผลิต

ภาคการผลิตประกอบด้วยส่วนงานหลายส่วนที่ทำหน้าที่ประสานงานกันเพื่อจัดหาเชื้อเพลิง (FuelCo) ผลิตกำลังไฟฟ้า (GenCo) และยื่นเสนอขายไฟฟ้า (SellCo) ในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าภายใต้กลไกการประมูล ส่วนงานเหล่านี้อาจแยกกันอยู่อย่างอิสระหรือรวมกันในรูปบริษัทผลิตไฟฟ้าขึ้นกับระเบียบของตลาดกลางฯ โครงสร้างของภาคการผลิตแสดงในรูป 2.1 ส่วนรายละเอียดมีดังนี้

- **FuelCo:** ทำหน้าที่จัดหาเชื้อเพลิงการผลิตกำลังไฟฟ้าประเภทต่างๆ เพื่อป้อนให้กับโรงจักรไฟฟ้าทั้งหมดที่มีในระบบ จำนวนของผู้ซื้อและผู้ขายเชื้อเพลิงทั้งในตลาดระดับภูมิภาคและระดับประเทศถือว่ามีจำนวนมาก
- **GenCo:** ทำหน้าที่บำรุงรักษาโรงจักรไฟฟ้าและส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยตอบสนองคำสั่งเดินเครื่องที่เป็นผลจากการซื้อขายในตลาดระยะสั้น บางครั้งอาจทำหน้าที่เป็นเจ้าของโรงจักรไฟฟ้าเพื่อยื่นประมูลขายไฟฟ้าในตลาดระยะสั้น ผู้ร่วมค้าในตลาดนี้มีจำนวนมาก ไม่มีกำแพงสำหรับการเข้าร่วมค้าในตลาดนี้
- **SellCo:** ทำหน้าที่ยื่นประมูลเพื่อขายไฟฟ้าโดยผ่านสัญญาแบบล่วงหน้าและสัญญาการซื้อขายในตลาดระยะสั้น โดยในบางครั้งอาจทำหน้าที่ประกันราคาระหว่างลูกค้าและบริษัทผู้ผลิตไฟฟ้าในตลาดการซื้อขายระยะยาว (สัญญาการซื้อขายแบบสองฝ่ายและแบบล่วงหน้า) เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ไม่สมดุล ผู้ร่วมค้าในตลาด SellCo มีจำนวนมากและอาจมีส่วนร่วมในการตัดสินใจลงทุนโรงไฟฟ้าแห่งใหม่ ไม่มีกำแพงสำหรับการเข้าร่วมค้าในตลาดแข่งขันชนิดนี้

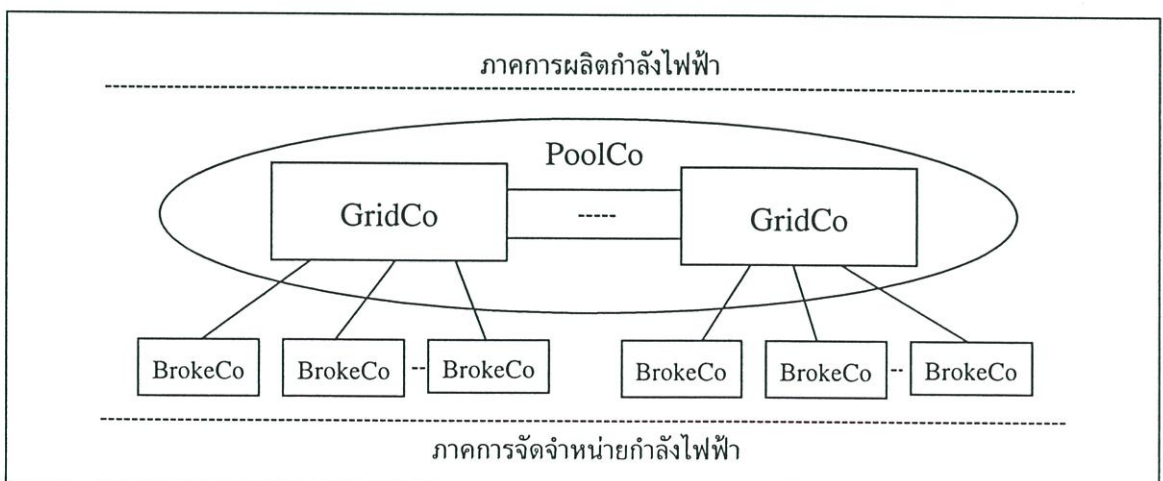


รูปที่ 2.1 ภาคการผลิตกำลังไฟฟ้า

2.2.2 ภาคการจัดส่ง

ภาคการจัดส่งกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยสามส่วนสำคัญคือ PoolCo GridCo และ BrokeCo รับผิดชอบการจัดส่งก่อนที่กำลังไฟฟ้าจะเข้าสู่ภาคการจัดจำหน่าย

- **PoolCo** มีหน้าที่กำกับดูแลตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในรูปแบบองค์กรผูกขาด ประกอบด้วย ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (Independent System Operator : ISO) ศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด (Market Operator : MO) และศูนย์บริหารการชำระเงิน (Settlement Administrator : SA) รายละเอียดของส่วนงานทั้งสามจะกล่าวในต่อไป ทั้งนี้ ISO MO และ SA ต้องไม่มีผลประโยชน์ใดในธุรกิจทั้งภาคการผลิตและการจัดจำหน่าย เพื่อความเป็นกลางในการดำเนินการของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า
- **GridCo** ทำหน้าที่ก่อสร้างและบำรุงรักษาโครงข่ายสายส่ง เนื่องจากโครงสร้างระบบส่งเกี่ยวข้องกับหลายส่วนงาน GridCo จึงต้องเป็นองค์กรผูกขาดโดยธรรมชาติภายใต้การควบคุมของภาครัฐ โดยไม่มีกำแพงสำหรับการเข้ามาในตลาดนี้ ส่วนงานนี้ต้องถูกควบคุมเพื่อต้องการการคืนทุน การบริการที่มีประสิทธิภาพ และการดำเนินการที่เป็นกลางโดยไม่มีทางเลือกปฏิบัติ
- **BrokeCo** ทำหน้าที่จับคู่ระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าในฐานะนายหน้าของสัญญาซื้อขายระยะยาว/ระยะสั้น และสัญญาการชดเชยในส่วนการจัดส่ง ในตลาดมี BrokeCo ที่มีศักยภาพเป็นจำนวนมากและไม่มีกำแพงของการเข้ามาในตลาด

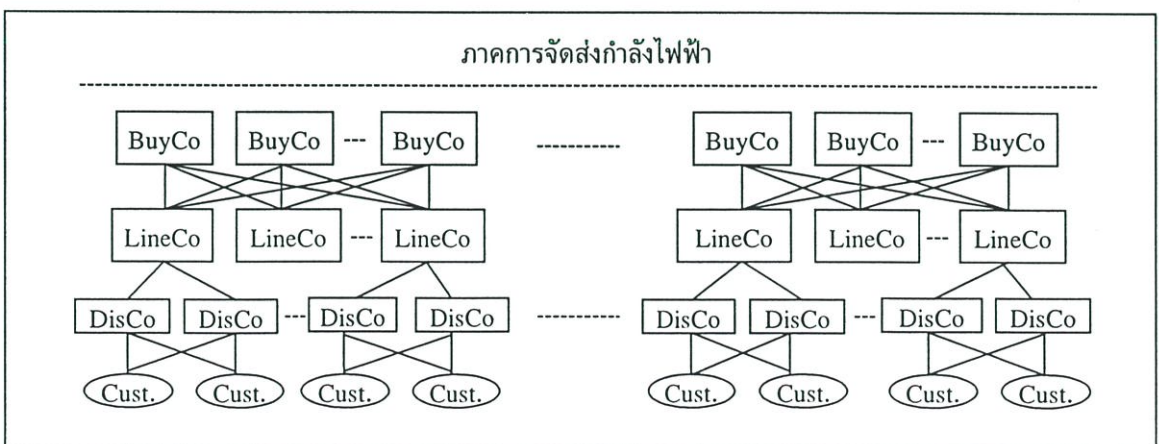


รูปที่ 2.2 ภาคการจัดส่งกำลังไฟฟ้า

2.2.3 ภาคการจัดจำหน่าย

ภาคการจัดจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนงานที่ทำหน้าที่ต่อเนื่องจากภาคการจัดส่ง ประกอบด้วย ส่วนงานที่ทำหน้าที่ซื้อไฟฟ้า (BuyCo) ส่วนงานที่ทำหน้าที่ดูแลสายจำหน่าย (LineCo) และส่วนงานที่ทำหน้าที่จำหน่ายกำลังไฟฟ้า (DisCo) ทั้งนี้ ส่วนงานทั้งสามอาจรวมอยู่ในองค์กรเดียวหรือแยกกันอย่างอิสระ โดยรายละเอียดดังนี้

- BuyCo ทำหน้าที่จัดซื้อไฟฟ้าโดยผ่านสัญญาซื้อขายระยะยาว/ระยะสั้นและสัญญาการชดเชยในส่วนของความสูญเสียที่เกิดจากการจัดส่ง เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังลูกค้าในระดับสุดท้าย ในตลาดมี BuyCo ที่มีศักยภาพเป็นจำนวนมากและไม่มีกำแพงสำหรับการเข้ามาแข่งขันในตลาดนี้
- LineCo ทำหน้าที่ก่อสร้างและบำรุงรักษาระบบสายจำหน่าย เชื่อมต่อกับกริดของระบบส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในระดับสุดท้าย ด้วยโครงสร้างสายจำหน่ายเกี่ยวข้องกับหลายส่วนงาน LineCo จึงต้องกลายเป็นองค์กรผูกขาดโดยธรรมชาติ ไม่มีกำแพงสำหรับการเข้ามาแข่งขันในตลาดนี้ ส่วนงานนี้ถูกควบคุมเพื่อต้องการการคืนทุน การบริการที่มีประสิทธิภาพ และการดำเนินการที่เป็นกลาง
- DisCo ทำหน้าที่ให้บริการแก่ลูกค้าในระดับสุดท้าย ซึ่งประกอบด้วยการจัดหาไฟฟ้าแก่ลูกค้าโดยการเชื่อมต่อกับสายจำหน่ายแรงต่ำ และการจัดทำใบแจ้งหนี้ค่าใช้ไฟฟ้า ในตลาดมี DisCo ที่มีศักยภาพเป็นจำนวนมากและไม่มีกำแพงสำหรับการเข้ามาแข่งขันในตลาดนี้



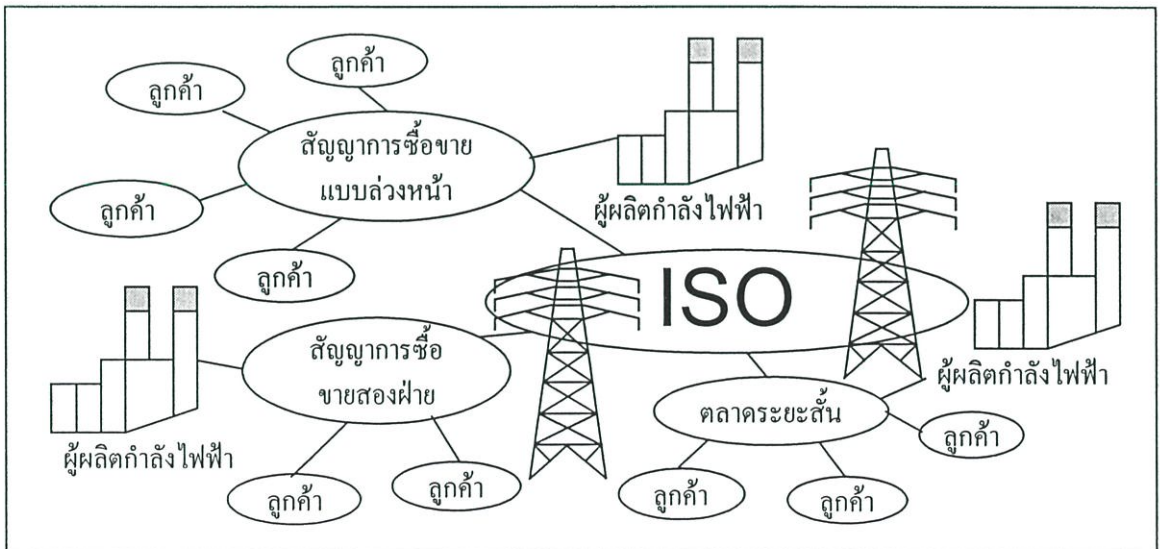
รูปที่ 2.3 ภาคการจัดจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

2.3 การค้าของตลาดขายส่งไฟฟ้า

2.3.1 ประเภทของสัญญาภายใต้ตลาดขายส่ง

สำหรับกิจการไฟฟ้าที่ภาคการผลิตดำเนินการแบบธุรกิจ กำลังไฟฟ้าจะถูกซื้อขาย โดยผ่านสัญญา 3 ประเภทด้วยกัน ประกอบด้วย สัญญาการซื้อขายแบบสองฝ่าย สัญญาการซื้อขายแบบล่วงหน้า และ สัญญาซื้อขายในตลาดระยะสั้น โดยสัญญาสองประเภทแรก ถือเป็นการดำเนินการในระยะยาว ส่วนสัญญาประเภทสุดท้ายเป็นการดำเนินการในระยะสั้น

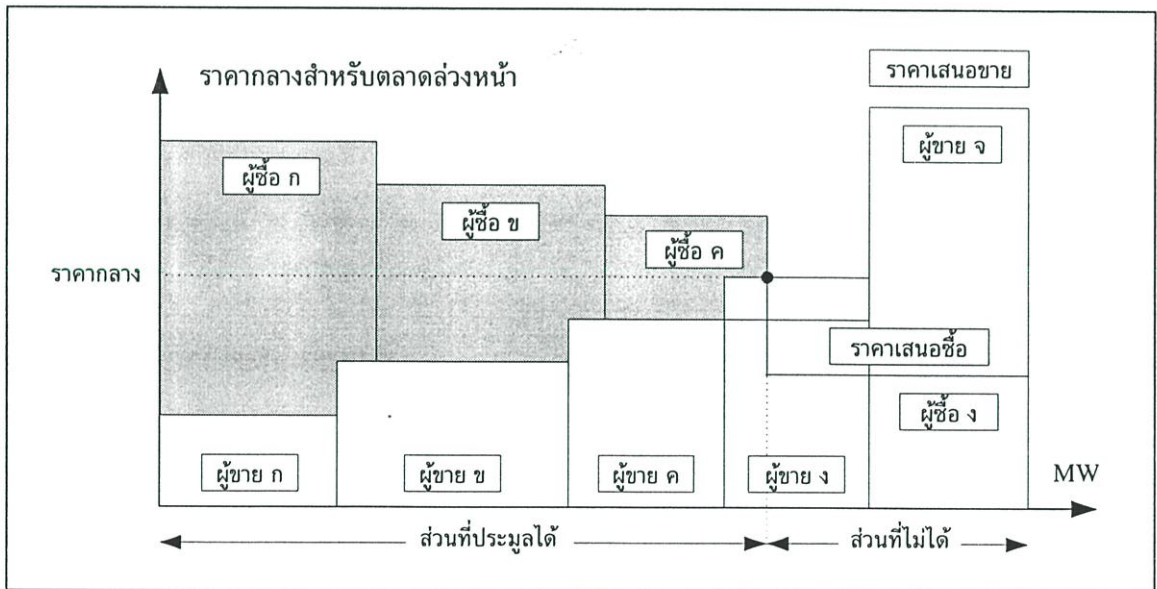
- สัญญาการซื้อขายแบบล่วงหน้า คือการซื้อขายโดยผ่านกลไกการประมูลซึ่งอาจเป็นการประมูลแบบล่วงหน้าระดับวันหรือระดับชั่วโมง สัญญาการจ่ายส่วนต่างจะถูกใช้เป็นเครื่องมือเพื่อลดความเสี่ยงในการประมูล ดังจะได้อธิบายต่อไป
- สัญญาการซื้อขายระยะสั้น คือการตกลงซื้อขายในตลาดที่ทำให้เกิดความสมดุลระหว่างความต้องการไฟฟ้าและความสามารถในการผลิตไฟฟ้าซึ่งเป็นการดำเนินการในขณะเวลาจริงและเป็นหน้าที่ของศูนย์ควบคุมระบบอิสระในการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า
- สัญญาการซื้อขายแบบสองฝ่าย คือการตกลงซื้อขายกำลังไฟฟ้าที่ขนาด ราคา และเวลาที่แน่นอนโดยมีจุดประสงค์เพื่อลดความเสี่ยงในการประมูลในตลาดอื่นๆ เงื่อนไขในการซื้อขายต้องอยู่ภายใต้ระเบียบข้อบังคับของกิจการไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 การค้าภายในตลาดขายส่งไฟฟ้า

2.3.2 สัญญาการซื้อขายแบบล่วงหน้า

เนื่องด้วยการค้าในตลาดระยะสั้นมีความผันผวนตามภาวะอุปสงค์และอุปทานทางไฟฟ้าที่ขึ้นลงตามช่วงเวลาของวัน ความผันผวนเหล่านี้มีผลกระทบต่อการวางแผนและการจัดการทางการเงินของผู้ร่วมค้า ดังนั้น เพื่อลดความผันผวนของการค้าและเพื่อความสะดวกในการกำหนดตารางการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บริษัทผลิตไฟฟ้าจะยื่นเสนอขายไฟฟ้าผ่านตลาดล่วงหน้าภายใต้กลไกการประมูล ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาจมาจากการพยากรณ์ของตลาดกลางหรือมาจากการยื่นราคาเสนอซื้อจากบริษัทจำหน่าย (หรือบริษัทหน้า) สำหรับกลไกการยื่นประมูล บริษัทผลิตไฟฟ้าอาจได้รับอนุญาตให้เสนอราคาขายได้เพียงครั้งเดียวสำหรับหนึ่งช่วงเวลาการค้า (1 ชั่วโมง หรือ ครึ่งชั่วโมง) โดยไม่สามารถทราบราคาขายของบริษัทอื่น กลไกการประมูลนี้เรียกว่า Static bidding หรือบริษัทผลิตไฟฟ้าอาจได้รับอนุญาตให้สามารถทบทวนราคาขายของตนในจำนวนครั้งและช่วงเวลาที่จำกัด โดยราคาขายของทุกบริษัทจะถูกแสดงให้ผู้ร่วมค้าทุกรายทราบเพื่อกระตุ้นการแข่งขัน กลไกการประมูลนี้เรียกว่า Dynamic bidding การค้าในตลาดล่วงหน้าเหล่านี้จะอยู่ภายใต้สัญญาการซื้อขายแบบล่วงหน้า และมีรายงานจากตลาดกลางฯ ของออสเตรเลียกล่าวว่า กำลังไฟฟ้ามากกว่า 50 % [5] มีการซื้อขายโดยผ่านสัญญาประเภทนี้ โดยอาจมีการควบคุมราคาหรือไม่ก็ได้ แม้ว่ากำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ถูกซื้อขายภายใต้สัญญาประเภทนี้ แต่ส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดกลับเป็นการซื้อขายภายใต้ตลาดระยะสั้น ตัวอย่างการกำหนดราคาซื้อขายแสดงในรูปที่ 2.5



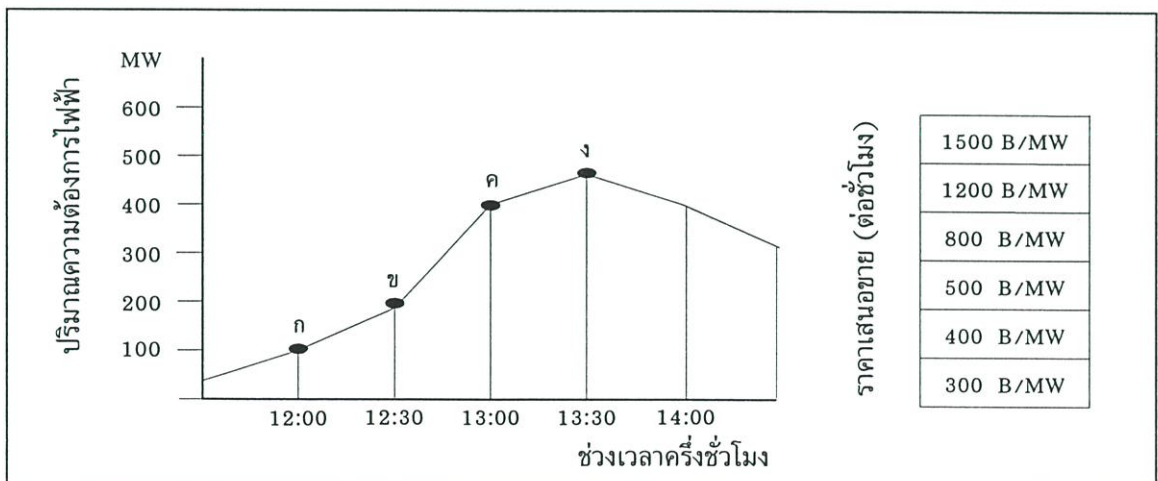
รูปที่ 2.5 การกำหนดราคากลางด้วยกลไกการประมูลในตลาดล่วงหน้า [13]

2.3.3 สัญญาการซื้อขายระยะสั้น

แม้ว่ากำลังไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะถูกซื้อขายผ่านสัญญาแบบล่วงหน้า และสัญญาระยะสั้นถือเป็นส่วนแบ่งการค่าน้อยที่สุด (เพียงแค่ 10 %) แต่การค้ำภายใต้สัญญาระยะสั้นถือเป็นส่วนที่มีความสำคัญสูงสุด เนื่องจากสะท้อนถึงสภาวะของอุปสงค์และอุปทานที่แท้จริง ราคาที่ได้ถูกใช้เป็นราคาอ้างอิงในสัญญาการจ่ายส่วนต่าง และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานทางไฟฟ้า บริษัทผลิตไฟฟ้าจะยื่นเสนอขายไฟฟ้าเข้ามาในตลาดระยะสั้นก่อนการดำเนินการจริงไม่นาน และศูนย์ควบคุมฯ จะสั่งเดินเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าโดยเริ่มจากโรงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำที่สุดก่อนเสมอ โดยต้นทุนการผลิตหน่วยสุดท้ายของระบบ (ราคากลาง) ถูกกำหนดจากราคาขายของโรงไฟฟ้าลำดับสุดท้ายที่ถูกเลือกให้เดินเครื่อง ตัวอย่างการดำเนินการของตลาดระยะสั้นแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.6 จากรูปแสดงให้เห็นถึงปริมาณความต้องการมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามช่วงเวลาของวัน (เลือก 12.00-14.00 น.) ซึ่งมีผลต่อการสั่งเดินเครื่องและราคากลาง โดยที่ปริมาณความต้องการ

ตารางที่ 2.1 การกำหนดราคากลาง (ต้นทุนการผลิตหน่วยสุดท้าย) สำหรับการซื้อขายระยะสั้น

ราคา (B/MW/hr)	เวลา	ความต้องการ (MW)	การเดินเครื่องโรงไฟฟ้า	จุด
1200	13:30	470	1- 4 เดินเครื่องเต็มที่, 5 บางส่วน	ง
800	13:00	400	1 2 3 และ 4 เดินเครื่องเต็มที่	ค
400	12:30	200	1 และ 2 เดินเครื่องเต็มที่	ข
300	12:00	100	1 เดินเครื่องเต็มที่	ก



รูปที่ 2.6 การกำหนดราคาซื้อขายในตลาดระยะสั้น

ไฟฟ้ามีค่าน้อย ณ เวลา 12:00 น. โรงไฟฟ้า 1 เพียงแห่งเดียวสามารถให้กำลังการผลิตที่เพียงพอได้ ปริมาณความต้องการเพิ่มเป็นสองเท่า ณ เวลา 12:30 น. โรงไฟฟ้า 1 และ 2 ต้องเดินเครื่องเต็มที่ และเพิ่มเป็นสี่เท่า ณ เวลา 13:00 น. ทำให้โรงไฟฟ้า 1 ถึง 4 ต้องเดินเครื่องเต็มที่ ในขณะที่โรงไฟฟ้า 5 ต้องเดินเครื่องเพียงบางส่วน ณ เวลา 13:30 แต่ราคาตลาดก็ต้องถูกกำหนดที่ราคาขายของโรงไฟฟ้า 5 ที่ราคา 1200 THB/MW

2.3.4 สัญญาการซื้อขายแบบสองฝ่าย

บริษัทผลิตไฟฟ้าและบริษัทจำหน่ายไฟฟ้าสามารถทำการซื้อขายกัน โดยไม่ต้องผ่านตลาดกลางฯ แต่ทั้งนี้ต้องอยู่ภายใต้ระเบียบข้อบังคับของตลาดกลางฯ สัญญาประเภทนี้เป็นการซื้อขายในปริมาณที่แน่นอนภายในช่วงเวลาที่กำหนดและราคาตามที่ได้ตกลงเอาไว้ สัญญาประเภทนี้อาจมีการควบคุมราคาหรือไม่ก็ได้และมีรายงานว่าปริมาณกำลังไฟฟ้ากว่า 40 % [5] มีการซื้อขายภายใต้สัญญาประเภทนี้ ทั้งนี้ ปริมาณการซื้อขายต้องถูกรายงานให้ทางตลาดกลางฯ ทราบ โดยจะถูกนำไปหักออกจากปริมาณการซื้อขายที่แท้จริงเพื่อการชำระเงินแก่ผู้ซื้อและผู้ขายต่อไป ซึ่งเป็นหน้าที่ของศูนย์บริหารการชำระเงิน ดังจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไปในหัวข้อตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

2.3.5 สัญญาการจ่ายส่วนต่าง

การตกลงซื้อขายกำลังไฟฟ้าในรูปแบบสัญญาแบบสองฝ่ายที่มีการควบคุมราคาจะช่วยควบคุมความเสี่ยงอันเนื่องมาจากความผันผวนของราคา สัญญารูปแบบนี้เราเรียกว่าสัญญาการจ่ายส่วนต่าง บริษัทผลิตไฟฟ้าจะตกลงซื้อขายกับคู่สัญญาโดยมีการกำหนดราคาตามสัญญา ซึ่งอาจมีความแตกต่างกันออกไปตามกำลังการผลิต เมื่อใดก็ตามที่ราคาตลาดในการซื้อขายระยะสั้นมีค่าสูงกว่าราคาตามสัญญา บริษัทผลิตไฟฟ้าต้องจ่ายส่วนต่างนี้คืนกับคู่สัญญา และในทางกลับกัน เมื่อใดก็ตามที่ราคาตลาดมีค่าต่ำกว่าราคาตามสัญญา บริษัทผลิตไฟฟ้าจะได้รับส่วนต่างนี้คืนจากคู่สัญญาของตน การใช้สัญญาการจ่ายส่วนต่างนี้ให้ราคาที่แน่นอนแก่ผู้ซื้อและผู้ขาย รวมทั้งลดภาระความเสี่ยงของผู้ผลิตไฟฟ้าและใช้ไฟฟ้าซึ่งจะช่วยให้ราคาไฟฟ้ามีเสถียรภาพและคาดการณ์ได้ และมีความเหมาะสมที่จะใช้โดยเฉพาะในช่วงต้นของการเตรียมการเข้าสู่ตลาดที่มีการแข่งขัน นอกจากนั้น สัญญาการจ่ายส่วนต่างยังควบคุมบริษัทผลิตไฟฟ้าไม่ให้ได้รับกำไรเกินควร โดยเรียกเก็บกำไรที่บริษัทผลิตไฟฟ้าได้รับการที่ราคาค่าไฟฟ้าในตลาดสูงกว่าที่คาดการณ์ คืนสู่ผู้บริโภคหรือหน่วยงานจัดการหนี้สินเพื่อช่วยลดภาระหนี้สินติดค้าง นอกจากนี้ รูปแบบของสัญญาการจ่ายส่วนต่างยังสามารถใช้ได้กับระดับค่าปลีก เพื่อช่วยลดความเสี่ยงอันเนื่องมาจากความผันผวนของราคาในตลาดกลางฯ เช่นเดียวกับการค้าในระดับขายส่ง

2.4 ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

2.4.1 คำจำกัดความ

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้ามีความหมายเป็นที่รวมของผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้า และเป็นที่รวมของข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับการแข่งขันด้วย ดังนั้นเราจึงสามารถกล่าวได้ว่า ตลาดกลางฯ มีส่วนช่วยให้เกิดการแข่งขัน ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อขาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกรณีที่มีจำนวนผู้ซื้อและผู้ขายมีมากมาย ตลาดกลางฯ จึงมีหน้าที่เป็นตัวกลางทางการค้าที่ช่วยให้ผู้ซื้อและผู้ขายไม่จำเป็นต้องติดต่อกันโดยตรง โดยตลาดกลางฯ จะได้รับค่าตอบแทนจากผู้ร่วมค้าในตลาดตามปริมาณการซื้อขายที่เกิดขึ้นจริงในอัตราตามที่ได้ตกลงไว้ กล่าวโดยสรุปแล้วตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าไม่แตกต่างจากตลาดกลางของสินค้าประเภทอื่นนัก แต่ต่างกันตรงที่สินค้าคือกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของวัน ซึ่งมีความยุ่งยากในการจัดส่งอย่างมาก จึงต้องมีหน่วยงานที่มารับผิดชอบหน้าที่ต่างๆ ดังจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

2.4.2 โครงสร้างของตลาดกลาง

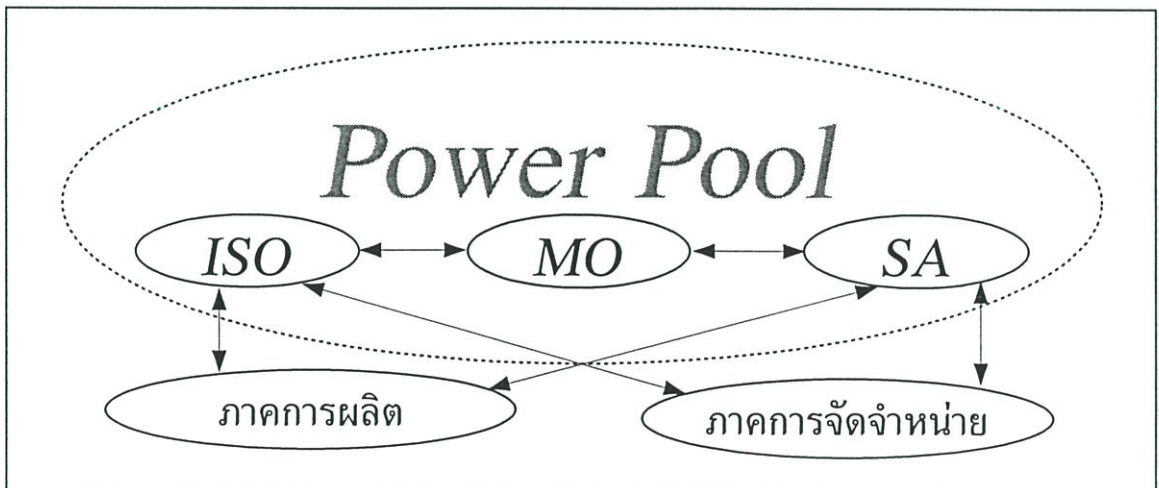
ด้วยเหตุกำลังไฟฟ้าไม่สามารถกักเก็บหรือมีความไม่คุ้มค่าในการกักเก็บ ดังนั้นเพื่อการดำเนินการระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถควบคุมให้มีความมั่นคง ตลาดกลางฯ จึงจำเป็นต้องประกอบขึ้นจาก 3 หน่วยงาน ดังต่อไปนี้ โครงสร้างตลาดกลางฯ แสดงในรูปที่ 2.7

- ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ: (ISO) ทำหน้าที่ในการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า และควบคุมการดำเนินงานของระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพและมีความน่าเชื่อถือ และรับผิดชอบหน้าที่ด้านเทคนิคทั้งหมด โดยไม่มีโรงไฟฟ้าเป็นของตนเอง นอกจากนี้ยังรับผิดชอบหน้าที่ในการวางแผนระบบกำลังไฟฟ้าของประเทศด้วย
- ศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด: (MO) มีหน้าที่บริหารตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า รวมไปถึงการกำหนดราคาค่าไฟฟ้าสำหรับตลาดล่วงหน้าและตลาดระยะสั้น วัดปริมาณการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดกลาง และทำหน้าที่ทุกอย่างทางการตลาด โดยหน้าที่การดำเนินงานของ ISO และ MO นั้นอาจอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของหน่วยงานเดียวกันได้
- ศูนย์บริหารการชำระเงิน: (SA) มีหน้าที่ทำความเข้าใจการชำระเงินค่าซื้อไฟฟ้า โดยอาจรวมเป็นหน่วยงานเดียวกันเป็นศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (ISO) และศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด (MO) หรือแยกออกมาเป็นองค์กรอิสระก็ได้ โดยที่ศูนย์บริหารการชำระเงินสามารถดำเนินการโดยหน่วยงานเอกชนหรือผู้ร่วมค้าในตลาดก็ได้

2.4.3 กลไกการซื้อขายภายในตลาดกลาง

การดำเนินการของตลาดกลางฯ จะมีทั้งการดำเนินการล่วงหน้าควบคู่ไปกับการดำเนินการในเวลาจริง ซึ่งอาจจะเป็นทุกหนึ่งชั่วโมงหรือทุกครึ่งชั่วโมง การดำเนินการล่วงหน้าเป็นการเปิดโอกาสให้บริษัทผลิตไฟฟ้าเสนอราคาประมูลขายไฟฟ้า และให้บริษัทสายส่งไฟฟ้ารายงานสภาพของระบบส่งไฟฟ้าก่อนเวลาดำเนินการ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสภาพการดำเนินการของระบบสายส่งและระบบผลิตไฟฟ้า อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงก่อนเวลาที่จะเกิดขึ้นจริง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการรายงานความเคลื่อนไหวให้ศูนย์ควบคุมระบบอิสระทราบ จนกระทั่งถึงเวลาดำเนินการจริง โดยศูนย์ควบคุมระบบอิสระจะใช้ข้อมูลที่ได้รับรายงานล่าสุดเป็นพื้นฐานสำหรับการสั่งการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้า

ก่อนการซื้อขายจริง บริษัทสายส่งไฟฟ้าจะรายงานสภาพของสายส่งไฟฟ้าในช่วงเวลาก่อนการซื้อขายจะเกิดขึ้น ในขณะเดียวกันนั้น บริษัทผลิตไฟฟ้าก็เสนอราคาประมูลและปริมาณไฟฟ้าที่ตนจะผลิตในช่วงเวลานั้น ส่วนศูนย์ควบคุมระบบอิสระจะทำการคาดการณ์ความต้องการการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาของการซื้อขายนั้นๆ หลังจากนั้นตลาดกลางฯ จะใช้ข้อมูลเพื่อกำหนดตารางการเดินเครื่องโรงไฟฟ้า รวมทั้งการใช้ระบบสายส่งไฟฟ้าและส่งข้อมูลนี้ไปยังบริษัทสายส่งไฟฟ้าและบริษัทผลิตไฟฟ้าก่อนเวลาซื้อขายจริง ในขณะเดียวกันศูนย์ควบคุมระบบอิสระติดตามและรายงานการเปลี่ยนแปลงสภาพของระบบ แล้วคอยส่งข้อมูลให้แก่บริษัทสายส่งไฟฟ้าและบริษัทผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้ สภาพการณ์ของระบบสายส่งหรือความสามารถในการผลิตของบริษัทผลิตไฟฟ้าอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงจนทำให้สายส่งไฟฟ้าในบริเวณนั้นไม่สามารถดำเนินการได้ ศูนย์ควบคุมระบบอิสระจึงต้องติดตามการรายงานอย่างใกล้ชิด เพื่อที่จะได้กำหนดตารางการเดินเครื่องอย่างเหมาะสมตามสภาพการณ์จริง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับภาคการผลิตและการจำหน่าย

สำหรับเวลาซื้อขายจริง บริษัทสายส่งไฟฟ้าและบริษัทผลิตไฟฟ้าจะรายงานข้อมูลล่าสุดเกี่ยวกับสภาพการณ์ระบบของตนให้แก่ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลสำหรับการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า หลังจากนั้นบริษัทผลิตไฟฟ้าและบริษัทสายส่งไฟฟ้าใช้คำสั่งการเดินเครื่องอันนี้ผลิตและส่งไฟฟ้า ศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาดทำการกำหนดราคาตลาดในช่วงเวลานั้น และรายงานปริมาณการซื้อขายไปยังศูนย์บริหารการชำระเงินและผู้ร่วมค้าในตลาด โดยผ่านสื่อออนไลน์ หนังสือพิมพ์ หรืออินเทอร์เน็ต ศูนย์ควบคุมระบบอิสระวัดปริมาณการซื้อขายที่เกิดขึ้นจริงแล้วส่งไปยังศูนย์บริหารการชำระเงินเพื่อดำเนินการต่อไป

ส่วนการจัดการด้านการเงิน ศูนย์บริหารการชำระเงินจะเป็นผู้จัดการในส่วนนี้ โดยจะรวบรวมข้อมูลการซื้อขายในตลาดกลางฯ ทั้งหมด รวมทั้งกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการซื้อขายนอกตลาดกลาง และคำนวณเงินค่าไฟฟ้าโดยหักปริมาณการซื้อขายนอกตลาดกลางออก บริษัทผลิตไฟฟ้ารับชำระเงินค่าไฟฟ้าที่ขายเข้าสู่ตลาดกลาง (ตามปริมาณที่วัดได้จริงคูณกับราคาค่าไฟฟ้าในตลาดกลาง แต่หักปริมาณไฟฟ้าที่ซื้อขายนอกตลาดออก) ในขณะเดียวกันผู้ค้าส่งก็ชำระเงินค่าซื้อไฟฟ้า (ตามปริมาณที่วัดได้จริงคูณกับราคาค่าไฟฟ้าในตลาดกลาง แต่หักปริมาณไฟฟ้าที่ซื้อขายนอกตลาดออก) มายังศูนย์บริหารการชำระเงิน ส่วนบริษัทผลิตไฟฟ้าที่ดำเนินการซื้อขายนอกตลาดกลางฯ ก็ชำระเงินจากการซื้อขายตามสัญญาที่ตนมีอยู่กับผู้ค้าส่ง ทั้งนี้ การซื้อขายนอกตลาดหมายถึงการซื้อขายผ่านสัญญาแบบสองฝ่าย

กล่าวโดยสรุปคือ โรงไฟฟ้าที่เสนอราคาขายต่ำสุดจะได้รับการคัดเลือกให้เดินเครื่องและจ่ายไฟฟ้าโดยศูนย์ควบคุมระบบอิสระ ศูนย์ควบคุมระบบอิสระจะเลือกโรงไฟฟ้าที่มีราคาถูกที่สุดก่อนและตามมาด้วยโรงไฟฟ้าที่ราคาสูงขึ้นตามลำดับจนถึงจุดที่มีกำลังการผลิตเพียงพอตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าโดยทั่วไปราคาของโรงไฟฟ้าโรงที่แพงที่สุดที่ได้รับคำสั่งให้เดินเครื่อง เปรียบเสมือนเป็นราคาการผลิตหน่วยสุดท้ายของระบบหรือราคากลาง และจะใช้เป็นส่วนสำคัญในการคิดอัตราค่าไฟฟ้าที่จะรับซื้อจากผู้ผลิตทุกรายในช่วงเวลานั้นต่อไป ยิ่งไปกว่านั้น ราคานี้ถือเป็นส่วนสำคัญของอัตราค่าไฟฟ้าภายใต้โครงสร้างใหม่ด้วย และภายใต้ระบบการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดกลางฯ โรงไฟฟ้าที่ไม่มีประสิทธิภาพก็จะไม่สามารถเสนอราคาที่แข่งขันกับโรงไฟฟ้าอื่นได้ และจะไม่ได้รับการคัดเลือกให้เดินเครื่องผลิตไฟฟ้า เมื่อไม่สามารถเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าก็จะมีรายได้ ดังนั้นการมีตลาดกลางจะทำให้โรงไฟฟ้าทุกโรงไม่ว่าโรงไฟฟ้าเก่าหรือโรงไฟฟ้าใหม่ ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพอยู่ตลอดเวลา มิฉะนั้นก็จะมีโอกาสขายไฟฟ้าได้ เช่น ถ้าหากมีโรงไฟฟ้าโรงหนึ่งผลิตไฟฟ้าและขายไฟฟ้ามานาน 10 ปี ต่อมาโรงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงเข้ามาในระบบ ถ้าโรงไฟฟ้าเก่าไม่ปรับปรุงประสิทธิภาพตนเองก็จะขายไฟฟ้าไม่ได้ และจะไม่มีรายได้ เพราะฉะนั้นการเพิ่มการแข่งขันโดยมีตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าและให้มีการซื้อขายไฟฟ้าจากผู้ค้าปลีกหลายรายจะทำให้การแข่งขันรุนแรงมากขึ้น

2.5 สรุป

การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าเกิดขึ้นครั้งแรกในทศวรรษที่ 1980 ณ สหราชอาณาจักร และกลุ่มประเทศละตินอเมริกา หลังจากนั้น แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงได้เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง จากโครงสร้างในรูปแบบผูกขาดไปสู่รูปแบบของการแข่งขัน ที่ซึ่ง หน้าที่ของการผลิต การจัดส่ง และการจัดจำหน่ายไฟฟ้าถูกแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ภายใต้โครงสร้างดังกล่าวนี้ ไฟฟ้าถูกพิจารณาเป็นสินค้าประเภทหนึ่งที่มีการซื้อขายผ่านสัญญา 3 ประเภท ประกอบด้วย สัญญาแบบล่วงหน้า สัญญาระยะสั้น และสัญญาแบบสองฝ่าย ยิ่งไปกว่านั้น สัญญาการจ่ายส่วนต่างจะถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับลดความเสี่ยงอันเนื่องมาจากความผันผวนทางการค้าในระดับขายส่ง ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญที่มีบทบาทอย่างมากและเป็นที่ยอมรับของผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าในระดับขายส่ง โดยประกอบขึ้นจาก 3 ส่วนงานสำคัญ คือ ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ ศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด และศูนย์บริหารการชำระเงิน ทั้งนี้ ส่วนงานทั้ง 3 สามารถรวมกันหรือแยกกันก็ได้ตามความเหมาะสม แต่ศูนย์ควบคุมระบบอิสระและศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด ต้องไม่มีผลประโยชน์ใดในธุรกิจของภาคการผลิตและการจัดจำหน่าย เพื่อความเป็นกลางในการดำเนินการ ส่วนศูนย์บริหารการชำระเงิน เป็นส่วนงานที่สามารถเปิดให้ภาคเอกชนเข้ามาดำเนินการได้

บทที่ 3

การคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า

3.1 ความเป็นมา

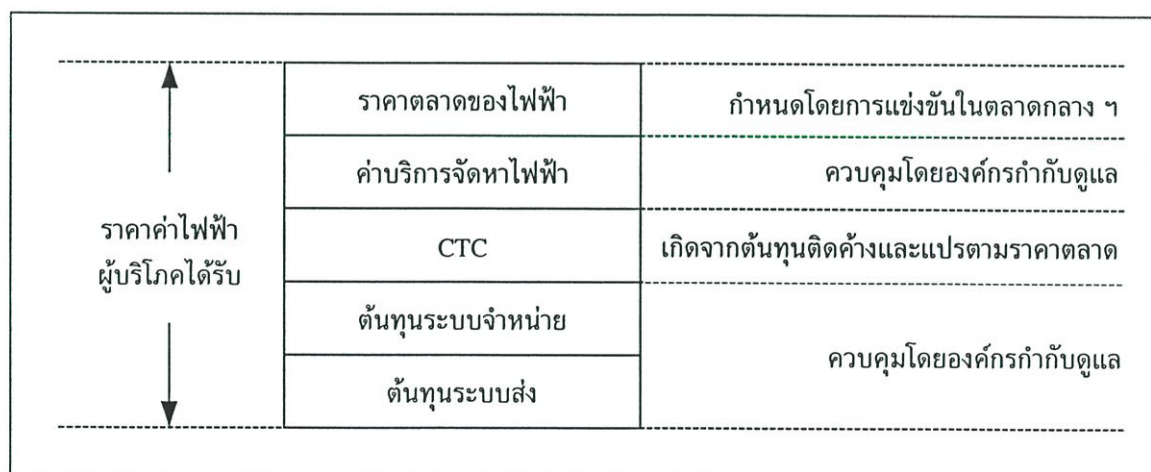
การกำหนดราคาสินค้ามีความหลากหลายตามประเภทของสินค้า [14] เช่นกันสำหรับไฟฟ้า ได้มีความพยายามที่จะกำหนดราคาให้สะท้อนถึงต้นทุนที่แท้จริงสำหรับการผลิตและการจัดจำหน่าย กำลังไฟฟ้า วิธีการกำหนดราคาค่าไฟฟ้าหลายรูปแบบได้มีการนำมาใช้ [15] ไม่ว่าจะเป็น การกำหนดราคาตามอัตราสองส่วน การกำหนดราคาด้วยอัตราที่แตกต่างกันตามเวลาของวัน การกำหนดราคาด้วยอัตราที่แตกต่างกันตามเวลาของการใช้ไฟฟ้า และสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ สำหรับกิจการไฟฟ้าของประเทศไทย ตามรายงานความก้าวหน้าการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้า [10] ราคาค่าไฟฟ้าได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนอย่างชัดเจน ราคาตลาดของไฟฟ้าเป็นส่วนที่มีความสำคัญสูงสุด เนื่องจากการปรับตัวตามความแปรปรวนของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับแต่ละช่วงเวลา

ศาสตราจารย์ Fred C. Schweppe และคณะ [16] ได้นิยามราคาตลาดของไฟฟ้าขึ้นในปี ค.ศ. 1988 ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3 องค์ประกอบของราคาตลาดสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย ราคาจากต้นทุนการผลิต ราคาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และราคาจากความคับคั่งบนสายส่งไฟฟ้า [17] นอกจากนี้ราคาตลาดของไฟฟ้ายังสามารถหาได้จากการคำนวณจุดออปติมอล [18] ที่มีการนำมาใช้ในระบบกำลังไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ [19] ออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ เริ่มมีการพัฒนาครั้งแรกในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 [20] และเข้ามามีบทบาทในระบบกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง อาทิ การกำหนดตารางการผลิตกำลังไฟฟ้า การสั่งเดินเครื่องในลักษณะ Preventive และ Corrective การหาจุดเหมาะสมในการปรับค่าระดับแรงดัน การปรับแทปหม้อแปลง และตัวชดเชยแบบต่างๆ การศึกษา-การวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ระบบดำเนินการในขอบเขตที่ปลอดภัย และการคิดราคาตลาดของไฟฟ้าหรืออาจเรียกว่าต้นทุนส่วนเพิ่ม ณ แต่ละบัส และด้วยคุณสมบัติประโยชน์ในหลายด้านของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ การวิจัยพัฒนาจึงมีออกมาจำนวนมากและต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน และการคำนวณไม่ว่าจะเป็น วิธี Newton, Neural Network, Fuzzy Logic และ Genetic Algorithm [21-25] วิธีการเหล่านี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงการแก้ปัญหาออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ให้ดียิ่งขึ้น

3.2 ราคาค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการไฟฟ้าในลักษณะแข่งขัน

3.2.1 หลักการกำหนดราคาค่าไฟฟ้า

สำหรับกิจการไฟฟ้าภายใต้โครงสร้างใหม่ที่ส่งเสริมการแข่งขัน บริษัทผลิตไฟฟ้า ยื่นเสนอขายไฟฟ้าผ่านกลไกการประมูลในตลาดกลางฯ ราคาขายของบริษัทที่มีราคาสูงสุดที่ได้รับเลือกให้เดินเครื่องถือเป็นราคากลาง โดยได้อธิบายในรายละเอียดไปแล้ว จากนั้น บริษัทจัดหาไฟฟ้าซื้อไฟฟ้าจากตลาดกลางฯ โดยผ่านระบบสายส่งและสายจำหน่ายในราคาตลาดบวกกับค่าบริการของระบบส่งและจำหน่าย (โดยอาจซื้อผ่านตัวแทนจัดหา BuyCo ดังได้อธิบายในหัวข้อ 2.1.3) และสุดท้าย บริษัทจัดหาไฟฟ้าขายไฟฟ้าไปยังผู้บริโภค ราคาไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปยังผู้บริโภคตั้งแต่ระดับการผลิต การจัดส่ง และการจัดจำหน่าย แต่สำหรับกิจการไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างกระบวนการปรับโครงสร้าง ค่าการเปลี่ยนเข้าสู่ระบบที่มีการแข่งขันจะถูกเพิ่มเข้ามาในราคาค่าไฟฟ้า ดังจะได้อธิบายต่อไปในภายหลัง ดังนั้น ด้วยกลไกการส่งผ่านราคาดังกล่าว เราสามารถสรุปได้ว่าราคาค่าไฟฟ้าประกอบ 4 ส่วน คือ 1. ราคาตลาด 2. ค่าใช้บริการสายส่งและสายจำหน่าย 3. ค่าบริการจัดหาไฟฟ้า และ 4. ค่าการเปลี่ยนเข้าสู่ระบบที่มีการแข่งขัน (CTC) โดยทุกส่วนของราคาจะอยู่ภายใต้การกำกับดูแลอย่างเหมาะสม โดยภาพรวม ราคาส่งตลาดถือเป็นส่วนที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดเนื่องจากมีความผันผวนอยู่ตลอดเวลาอันเกิดจากภาวะของอุปสงค์และอุปทานทางไฟฟ้าของระบบ และยิ่งกว่านั้น ราคาส่งตลาดยังส่งผลกระทบต่อข้อกำหนดค่า CTC อีกด้วย โครงสร้างการกำหนดราคาค่าไฟฟ้าในกิจการไฟฟ้ารูปแบบแข่งขันถูกแสดงในรูปที่ 3.1 ส่วนรายละเอียดของราคาในส่วนต่างๆ จะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของราคาค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการไฟฟ้าภายใต้โครงสร้างที่มีการแข่งขัน [10]

3.2.2 ค่าการเปลี่ยนเข้าสู่ระบบที่มีการแข่งขัน

เนื่องด้วยการลงทุนในรัฐวิสาหกิจในโครงสร้างกิจการไฟฟ้าเดิม ไม่ว่าจะเป็นการลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อเสริมกำลังการผลิตให้เพียงพอกับช่วงที่มีปริมาณการใช้ไฟมาก การว่าจ้างบุคลากรจำนวนมาก ตลอดจนการเดินทางเครื่องโรงไฟฟ้าเก่าที่ไม่มีประสิทธิภาพนั้น เป็นต้นทุนจำนวนมากมหาศาล แต่เดิมต้นทุนเหล่านี้มีอยู่แต่ไม่ปรากฏชัดเจน แต่ในกิจการไฟฟ้าใหม่ที่มีการแข่งขัน ต้นทุนติดค้างเหล่านี้ปรากฏชัดเจนขึ้น เนื่องจากการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าให้มีการแข่งขันจะทำให้ราคาไฟฟาลดลง ต้นทุนติดค้างนี้ยังคงอยู่และไม่สามารถหลีกเลี่ยงหรือเรียกคืนได้จากระบบใหม่ที่มีการแข่งขัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีกลไกเพื่อใช้ในการหักลบต้นทุนติดค้างนี้ออกไปให้ได้ ค่าการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ระบบที่มีการแข่งขัน หรือ CTC จะถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาในส่วนนี้ โดยมีความหมายเป็นค่าส่วนต่างระหว่างราคาต้นทุนระยะสั้นกับราคาขายส่งในตลาดกลางๆ ค่า CTC จะปรับขึ้นลงตามราคาตลาดที่เกิดขึ้นจริง หากราคาขายส่งในตลาดสูงกว่าที่คาดการณ์ไว้ ค่า CTC จะต่ำลง ยิ่งกว่านั้น CTC จะค่อยๆ ลดลงตามต้นทุนติดค้างที่หักลบไป ผู้ใช้ไฟจะจ่ายค่า CTC รวมเป็นส่วนหนึ่งของค่าไฟฟ้า โดยในใบเรียกเก็บเงินค่าไฟฟ้าจะมีการแสดงค่า CTC อย่างชัดเจน

3.2.3 ค่าบริการจัดหาไฟฟ้า

การให้บริการจัดหาไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็น การใช้มิเตอร์ตรวจวัดการใช้ไฟฟ้า การออกใบเรียกเก็บเงิน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการค้าปลีกไฟฟ้า เป็นธุรกิจที่ยังไม่ชัดเจนว่าการแข่งขันจะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้บริโภคมากเพียงพอเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น จากการที่มีผู้แข่งขันให้บริการเหล่านี้มากกว่า 1 ราย ในพื้นที่เดียวกัน ดังนั้น การกำหนดให้มีการแข่งขันในธุรกิจนี้ตั้งแต่ต้นอาจทำให้สูญเสียประโยชน์จากการประหยัดต่อขนาด ทำให้ต้นทุนการบริการเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น ส่วนงานนี้และบริษัทระบบสายจำหน่ายจึงอาจถูกรวมเข้าด้วยกัน แล้วขายบริการส่วนนี้ให้แก่บริษัทค้าปลีกไฟฟ้า เนื่องจากความไม่คุ้มทุนหากบริษัทค้าปลีกไฟฟ้าต้องการลงทุนเอง อย่างไรก็ตาม หากมีภาคเอกชนรายใดเล็งเห็นประโยชน์ของการจัดการในส่วนนี้ ก็สามารถเสนอตัวเข้ามาแข่งขันในตลาดได้

3.2.4 ค่าบริการสายส่งและสายจำหน่าย

หลักการคิดค่าบริการสายส่งและสายจำหน่ายมีวิธีการคิดได้หลายแบบไม่ว่าจะเป็น Flat Fee (คิดค่าบริการในอัตราเดียวกัน) แบบ Postage Stamp (คิดค่าบริการจากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่าน ไม่คิดระยะทาง) แบบ MW-Mile (คิดค่าบริการตามปริมาณและระยะทาง) แบบ Contract Path (คิดค่าบริการตามร้อยละของราคาเต็มที่พักัดการส่ง) และแบบ Locational Marginal Price (ราคาจริงทางเศรษฐศาสตร์) แบบสุดท้ายมีความยุ่งยากที่สุด แต่เป็นการกำหนดราคาที่เหมาะสมและนิยมมากที่สุด โดยถือเป็นต้นทุนจริงของระบบไฟฟ้า

3.2.5 ราคาตลาดของไฟฟ้า

ราคาตลาดของไฟฟ้างแสดงในรูปแบบที่ 3.1 มีความหมายเท่ากับ ราคาตลาด (หรือ ต้นทุนการผลิตหน่วยสุดท้ายของระบบ) บวกกับ ค่าความพร้อมในการจ่ายไฟฟ้า ที่เป็นค่าผู้ดูแลระบบรับผิดชอบจ่ายให้แก่บริษัทผลิตไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นบริการเสริมที่มีความสำคัญอันหนึ่ง โดยค่าดังกล่าวนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามกำลังการผลิตของระบบ หากระบบมีกำลังการผลิตสำรองมาก ค่าความพร้อมในการจ่ายไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ แต่สำหรับกรณีที่กำลังการผลิตสำรองเหลือน้อย ค่าดังกล่าวก็จะมีค่าสูง และเพื่อความสะดวกในการอธิบาย เราถือว่ากำลังการผลิตสำรองของระบบมีปริมาณมากจนทำให้ค่าความพร้อมในการจ่ายไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ส่วนรายละเอียดของราคาตลาดแสดงในหัวข้อต่อไป

3.3 ราคาตลาดของไฟฟ้า

3.3.1 คำจำกัดความ

การคิดราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้ามีการกล่าวถึงครั้งแรกโดย ศาสตราจารย์ Fred C. Schweppe และคณะ [16] โดยพวกเขาได้อธิบายถึงหลักในการคำนวณและพิสูจน์ให้เห็นว่าการพยากรณ์ต่างๆ ในระบบกำลังไฟฟ้ามีความผิดพลาดอย่างแน่นอน และได้สรุปว่า การซื้อขายไฟฟ้าในตลาดระยะสั้นเป็นส่วนสำคัญที่แสดงสภาวะที่แท้จริงของการซื้อขายในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า โดยนิยาม ราคาตลาดของไฟฟ้าคิดจากต้นทุนส่วนเพิ่มสำหรับการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่ต่างแตกต่างกันของระบบกำลังไฟฟ้า โดยมีสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการ (3.1)

$$\rho_i = \frac{\partial C_T}{\partial P_d} \quad (3.1)$$

$$F_{SW} = \sum_i (B_i - C_{P_{Gi}}) \quad (3.2)$$

$$F_{SC} = \sum_i (C_{P_{Gi}} - B_i) \quad (3.3)$$

โดยต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบที่ประกอบด้วย 1. สมดุลของพลังงาน 2. ขีดจำกัดในการผลิต 3. กฎของเคอร์ชอฟ 4. ขีดจำกัดของระบบสายส่ง หมายถึงกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งในแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินพิกัดของเส้นทางนั้น และต้องไม่ก่อปัญหาในการดำเนินการของระบบ โดยทั้ง 4 ข้อนี้จะกลายเป็นข้อกำหนดสำหรับการคิดราคาตลาดของไฟฟ้าและเป็นส่วนทำให้ระบบกำลังไฟฟ้าสามารถดำเนินการอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย ปัญหาการคิดราคาตลาดของไฟฟ้ามีเป้าหมายเพื่อหาค่าสูงสุดของ Social Welfare Function

(F_{SW}) ในสมการ (3.2) ในความหมายเดียวกัน เราสามารถหาค่าต่ำสุดของ Social Cost Function (F_{SC}) ในสมการ (3.3) แต่เนื่องจากปริมาณความต้องการไฟฟ้า (B_i) เป็นสิ่งที่ไม่ทราบล่วงหน้าและราคาตลาดได้จากการคำนวณ ณ เวลาจริง ความต้องการไฟฟ้า (B_i) จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา เป้าหมายของการคำนวณจึงกลายเป็นเพียงการหาค่าต่ำสุดของต้นทุนการผลิตที่บริษัทผู้ผลิตไฟฟ้ายื่นเสนอขายเข้ามาในตลาดกลางฯ

3.3.2 องค์ประกอบของราคาตลาด

ราคาตลาดของไฟฟ้าซึ่งต้องเรียกเก็บจากลูกค้า ณ บัส i บนโครงข่ายระบบสายส่ง ประกอบขึ้นจากองค์ประกอบทั้งจากส่วนของการผลิตกำลังไฟฟ้าและส่วนของระบบสายส่งไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ 3.4

$$\rho_i = \gamma_F + \gamma_M + \gamma_{QS} + \gamma_R + \eta_{L,i} + \eta_{QS,i} + \eta_{R,i} \quad (3.4)$$

จากนิยามของราคาตลาดของไฟฟ้าในสมการ (3.1) ทำให้องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการคืนทุนทั้งจากการผลิตและระบบสายส่งไม่ได้นำมาพิจารณา และองค์ประกอบของราคาตลาดที่เหลือจากสมการ (3.4) สามารถจำแนกได้ดังสมการ (3.5-3.8)

$$\lambda_S = \gamma_F + \gamma_M \quad (3.5)$$

$$\gamma_G = \lambda_S + \gamma_{QS} \quad (3.6)$$

$$\eta_i = \eta_{L,i} + \eta_{QS,i} \quad (3.7)$$

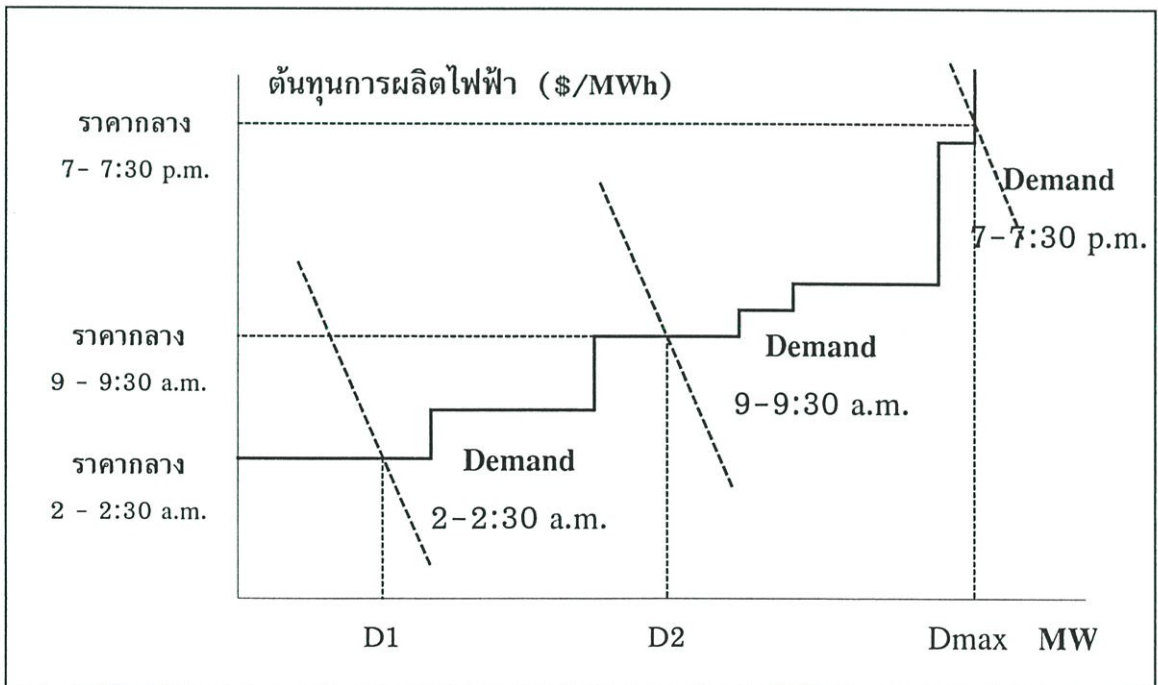
$$\rho_i = \gamma_G + \eta_i \quad (3.8)$$

$$\rho_i = \rho_i^R + \rho_i^L + \rho_i^C \quad (3.9)$$

ทั้งนี้ ราคาตลาดของไฟฟ้ายังสามารถจำแนกออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ 1. ต้นทุนส่วนเพิ่มในการผลิตไฟฟ้า หรือ ต้นทุนการผลิตหน่วยสุดท้ายของระบบ (องค์ประกอบส่วนนี้มีอิทธิพลสูงสุดต่อราคาตลาดของไฟฟ้า) 2. ต้นทุนส่วนเพิ่มจากความสูญเสียในระบบส่งไฟฟ้า และ 3. ต้นทุนส่วนเพิ่มจากความคับคั่งในระบบส่งไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ (3.9) ราคาตลาดของไฟฟ้ายังสามารถคำนวณได้จากออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ [19-24] โดยตัวคุณลักษณะของสมการข้อกำหนดได้ให้ความหมายทางเศรษฐศาสตร์เท่ากับราคาตลาดของไฟฟ้าโดยครอบคลุมองค์ประกอบในสมการ (3.9) อย่างครบถ้วน ปัญหาสำหรับการคิดราคาตลาดของไฟฟ้าจึงกลายเป็นปัญหาที่ขยายผลจากการทำการทำออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ โดยรายละเอียดของการทำออปติมอลพาวเวอร์โพลว์จะอธิบายภายหลัง

3.3.3 การตอบสนองต่อสภาวะของตลาด

ด้วยกลไกการซื้อขายในตลาดกลาง บริษัทผู้ผลิตไฟฟ้าสามารถยื่นเสนอราคาขายไฟฟ้าในราคาที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละช่วงเวลาของวัน แต่เพื่อความสะดวกในการอธิบาย เราถือว่ากลุ่มบริษัทผู้ผลิตไฟฟ้ายื่นเสนอราคาขายไฟฟ้าคงที่ตลอดวัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เราเลือกช่วงเวลาที่แตกต่างกัน 3 ช่วง เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับปริมาณความต้องการไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงใน 1 วัน ในตอนเช้ามืด ปริมาณความต้องการไฟฟ้ามียิ่งเล็กน้อย ต้นทุนการผลิตหน่วยสุดท้ายของระบบจึงถูกกำหนดให้เท่ากับราคาขายของบริษัทผลิตไฟฟ้าที่มีราคาต่ำที่สุด และในตอนเช้า ปริมาณความต้องการไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ราคาตลาดจะถีบตัวสูงขึ้นไปสู่จุดที่มีความสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทาน สำหรับบริษัทผลิตไฟฟ้า ส่วนต่างระหว่างราคาตลาดและต้นทุนจริงในการผลิตคือกำไรที่ได้จากตลาดระยะสั้น ในช่วงเย็นที่ปริมาณความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงขีดสูงสุด ราคาตลาดจะมีค่าสูงมาก ลูกค้านางราย (โรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงมากเพียงพออาจได้รับอนุญาตให้ซื้อไฟฟ้าโดยตรงจากตลาดกลาง) จะตอบสนองต่อสภาวะของตลาดอันนี้โดยการปรับลดการปริมาณการใช้ไฟฟ้าลง เพื่อไปเดินเครื่องในช่วงเวลาที่ไฟฟ้ามีราคาต่ำลง ทั้งนี้ลูกค้าที่สามารถปรับลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าลงได้ และจะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับผู้บริโภคในตลาดสินค้าประเภทอื่น ราคาตลาดของไฟฟ้าจะปรับตัวขึ้นลงโดยตอบสนองสภาวะจริงของตลาดการซื้อขายไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 ราคาตลาดที่ตอบสนองภาวะอุปสงค์และอุปทานทางไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ [13]

3.4 ออปติมอลพาวเวอร์โพลว์

3.4.1 คำจำกัดความ

ออปติมอลพาวเวอร์โพลว์เกี่ยวข้องกับการหาค่าที่ดีที่สุด (ค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด) ของดัชนีสมรรถนะหรือฟังก์ชันเป้าหมายที่เป็นฟังก์ชันในเทอมของกลุ่มตัวแปรสแตท โดยการปรับค่าของกลุ่มตัวแปรควบคุม และด้วยผลเฉลยของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์บางส่วน ได้ให้ความหมายทางเศรษฐศาสตร์เป็นราคาตลาดของไฟฟ้า ดังได้อธิบายไปแล้วในตอนต้น สมการคณิตศาสตร์ของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ แสดงในสมการ (3.10)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & F(x) \\ \text{subject to} \quad & g(x) = 0 \\ & h(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

ฟังก์ชันลากรองเจียนของปัญหาการทำออปติมอลพาวเวอร์โพลว์สามารถแสดงด้วยสมการคณิตศาสตร์ ดังสมการ (3.11)

$$L = F(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x) \quad (3.11)$$

3.4.2 เงื่อนไขความออปติมอล

ทฤษฎีของ Karush–Kuhn–Tucker (KKT) ได้กล่าวไว้ว่า ผลเฉลย \hat{x} ของปัญหาออปติมอลจะสอดคล้องกับทุกข้อกำหนดในสมการ (3.10) ในขณะที่ เวกเตอร์ $\hat{\lambda}$ และ $\hat{\mu}$ ต้องปรากฏขึ้นและสอดคล้องตามเงื่อนไขทั้งหมดในสมการ (3.12) นั่นคือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันลากรองเจียนทั้งหมดต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดออปติมอล ซึ่งเรียกว่า เงื่อนไขของความออปติมอลอันดับที่ 1 ของ KKT (KKT's first order optimality condition)

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (F(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x)) \Big|_{\hat{x}, \hat{\lambda}, \hat{\mu}} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= g(x) \Big|_{\hat{x}} = 0 \\ \text{diag}\{\mu\} \frac{\partial L}{\partial \mu} &= \text{diag}\{\mu\} h(x) \Big|_{\hat{x}, \hat{\mu}} = 0 \\ \mu &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.4.3 การจำแนกประเภทตัวแปร

กระบวนการหาผลเฉลยของปัญหาออปติมอลพาวเวอร์โพล์จะง่ายต่อเข้าใจได้ยิ่งขึ้น ถ้ามีการจำแนกตัวแปรออกเป็นประเภทอย่างชัดเจน ดังอธิบายต่อไปนี้

- **ตัวแปรของความต้อการ:** ตัวแปรประเภทนี้แทนค่าคงที่ ต้องไม่ถูกเปลี่ยนค่าในขั้นตอนของการคำนวณ ตัวแปรประเภทนี้ประกอบด้วย
 - ความต้อการแอกทีฟพาวเวอร์ ณ PQ Bus
 - ความต้อการรีแอกทีฟพาวเวอร์ ณ PQ Bus
 - ตัวแปรอื่นที่อาจเป็นตัวแปรควบคุมที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลง
- **ตัวแปรควบคุม:** ตัวแปรประเภทนี้แทนตัวแปรทั้งหมดที่สามารถปรับค่าเพื่อให้สามารถสนองความต้อการใช้ไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ที่จะได้อธิบายต่อไป ตัวแปรประเภทนี้ประกอบด้วย
 - แอกทีฟพาวเวอร์ ณ PV Bus
 - ขนาดแรงดันไฟฟ้า ณ PV Bus
 - ตำแหน่งของแทปหม้อแปลงไฟฟ้า
 - Shunt capacitor หรือ Reactance
- **ตัวแปรสเตท:** ตัวแปรนี้ประกอบด้วยตัวแปรทั้งหมดที่สามารถอธิบายสถานะของระบบกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไป ตัวแปรประเภทนี้ประกอบด้วย
 - ขนาดของแรงดัน ณ ทุกบัสของระบบ
 - มุมของแรงดัน ณ ทุกบัสของระบบ
- **ตัวแปรเอาต์พุท:** ตัวแปรประเภทนี้หมายถึงตัวแปรทั้งหมดที่สามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันของตัวแปรสเตทและตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย
 - กำลังไฟฟ้า (MVA, MW, MVA_r, A) ที่เคลื่อนบนสายส่งจากบัส $i \rightarrow j$
 - การผลิตกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ณ PV Bus

โดยส่วนใหญ่เป็นตัวแปรที่มีค่าต่อเนื่อง ในขณะที่บางตัวแปร เช่น แทปหม้อแปลงไฟฟ้าและสถานะของ Shunt capacitor และ Shunt reactor มีค่าไม่ต่อเนื่อง ตัวแปรไม่ต่อเนื่องจะถูกประมาณเป็นค่าต่อเนื่องและกำหนดให้เท่ากับค่าที่ใกล้เคียงที่สุด ภายหลังจากขั้นตอนการหาผลเฉลย ซึ่งไม่รับประกันความออปติมอล แต่วิธีนี้ก็ถูกนำไปใช้ในงานจริง

3.4.4 ขีดจำกัดสำหรับการดำเนินการ

สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าจริงมีตัวแปรจำนวนมากถูกนำเข้ามาพิจารณา และเพื่อให้ระบบดำเนินการอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย จึงมีขีดจำกัดของตัวแปรต่างๆ ดังสมการ

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (3.13)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \quad (3.14)$$

$$|V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max} \quad (3.15)$$

$$\Theta_i^{\min} \leq \Theta_i \leq \Theta_i^{\max} \quad (3.16)$$

$$s_i^{\min} \leq s_i \leq s_i^{\max} \quad (3.17)$$

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad (3.18)$$

สมการ (3.13-3.18) แสดงขีดจำกัดของ แอคทีฟพาวเวอร์ รีแอกทีฟพาวเวอร์ ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า Shunt reactor และแทปหม้อแปลง ณ แต่ละบัส

3.4.5 สมการข้อกำหนด

เนื่องจากผลเฉลยของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ต้องสอดคล้องกับหลักการของ Power Flow อย่างไม่มีเงื่อนไข ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว สมการของ Power Flow ณ แต่ละบัสจึงถูกกำหนดเป็นสมการข้อกำหนดของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ ดังแสดงในสมการ (3.19)

$$P_{Gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^{N_B} V_i V_j |Y_{ij}| \cos(\Theta_i - \Theta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (3.19)$$

$$Q_{Gi} - Q_{di} - \sum_{j=1}^{N_B} V_i V_j |Y_{ij}| \sin(\Theta_i - \Theta_j - \theta_{ij}) = 0$$

สมการข้อกำหนดในสมการ (3.19) ให้ความหมายถึงความสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานทางไฟฟ้าและแสดงข้อบังคับทางกายภาพของระบบ ซึ่งคือ Power Flow นั่นเอง

3.4.6 อสมการข้อกำหนด

อสมการข้อกำหนดของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์มีหน้าที่จำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เคลื่อนบนสายส่งไฟฟ้าให้อยู่ภายในขอบเขตทางกายภาพ ดังแสดงในสมการ (3.20)

$$S_{ij}^{\min} \leq S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} \quad (3.20)$$

3.4.7 ฟังก์ชันเป้าหมาย

การลดต้นทุนรวมของการผลิตกำลังไฟฟ้าและการลดความสูญเสียบนระบบสายส่งไฟฟ้าถือเป็นเป้าหมายหลักของการทำออปติมอลพาวเวอร์โฟลว์ โดยส่วนงานที่ทำหน้าที่ควบคุมระบบมีหน้าที่ตัดสินใจว่าเป้าหมายใดมีความสำคัญสูงสุด โดยมากขึ้นกับลักษณะของกิจการไฟฟ้าเองด้วย ว่าดำเนินการในลักษณะธุรกิจผูกขาดหรือแข่งขัน ส่วนรายละเอียดของฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองประเภทถูกอธิบายโดยสรุปดังต่อไปนี้

- ประเภทแรก: การลดต้นทุนรวมของการผลิตกำลังไฟฟ้าให้มีค่าน้อยที่สุด โดยปกติ ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้ามีสมการอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเพิ่มและอาจกลายเป็นฟังก์ชันลดได้เมื่อกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง (สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางชนิด) แต่สำหรับกิจการไฟฟ้าที่ดำเนินการในลักษณะธุรกิจด้วยระเบียบของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตจะถูกบังคับให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันเพิ่มเพียงเท่านั้น ดังแสดงในสมการ (3.21)

$$C_{P_{Gi}} = \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma P_{Gi}^2 \quad (3.21)$$

สัมประสิทธิ์ทั้งสามของฟังก์ชันต้นทุนของบริษัทผลิตไฟฟ้าแต่ละแห่งถูกยื่นเข้ามาในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าเพื่อเข้าสู่กลไกการประมูล ดังได้อธิบายในบทที่ 2 ดังนั้น ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าโดยรวมจึงหมายถึง ผลรวมของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าทุกแห่งที่ถูกสั่งให้เดินในช่วงเวลานั้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาค่าต่ำสุดของต้นทุนรวมอันนี้ ดังแสดงในสมการ (3.22)

$$\text{Min } F(x) = \text{Min } \sum_{i=1}^N C_{P_{Gi}} \quad (3.22)$$

โดยที่ l = จำนวนของ PQ Bus
 N = จำนวนบัสทั้งหมด
 $m = N - 1$ = จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องนำมาคำนวณ

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในบางครั้งอาจถูกแทนด้วยรูปฟังก์ชันเชิงเส้นในช่วง ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟที่เรียกว่า Willan's line [40] แต่เพื่อความสะดวกในการศึกษาระเบียบวิธีสำหรับการหาผลเฉลย ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตที่มีลักษณะของเส้นโค้งกำลังสอง ดังสมการ (3.21) จึงได้นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

- ประเภทที่สอง: การลดความสูญเสียบนระบบสายส่งให้มีค่าน้อยที่สุด

ความสูญเสียบนระบบสายส่งไฟฟ้าสามารถอธิบายได้หลายแนวทาง แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเพียง 2 แบบ คือ 1. ผลรวมของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในทุกเส้นทางที่นำมาพิจารณา 2. ผลรวมของแอดคทีฟพาวเวอร์ที่เกิดขึ้น ณ ทุกบัสของระบบ ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปนี้

1. ความสูญเสียคำนวณจากทุกเส้นทางบนระบบสายส่ง ความสูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับผลรวมของความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากทุกเส้นทางของสายส่งไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวในบริเวณที่พิจารณา โดยผลรวมนี้จะได้นำมาหาค่าต่ำสุด ดังสมการ (3.23)

$$F_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^{\text{NB}} F_{\text{Loss}_i} \quad (3.23)$$

โดยที่ $F_{\text{Loss}_i} = P_{km} + P_{mk}$ (สายส่งเส้น i อยู่ระหว่างบัส k และ m) (3.24)

NB = จำนวนเส้นทางทั้งหมดของสายส่งไฟฟ้าในบริเวณที่พิจารณา

สำหรับสมการ (3.24) กำลังไฟฟ้าที่เคลื่อนระหว่างบัส k และบัส m สามารถแทนด้วยสมการ (3.25) สำหรับระบบพิกัดเชิงขั้ว ดังนี้

$$F_{\text{Loss}_i} = (V_k^2 - V_m^2)y_{mk} \cos \theta_{mk} + V_m V_k y_{km} (\cos(\Theta_m - \Theta_k - \theta_{mk}) - \cos(\Theta_k - \Theta_m - \theta_{mk})) \quad (3.25)$$

2. ความสูญเสียคำนวณจากทุกบัสของระบบ สำหรับกรณีนี้ มีเพียงความสูญเสียของระบบรวมเท่านั้นที่สามารถคำนวณได้ โดยไม่ทราบของระบบย่อย การคำนวณความสูญเสียรวมมีลักษณะคล้ายคลึงกับการคำนวณต้นทุนโดยรวม นั่นคือ เท่ากับผลรวมของแอดคทีฟพาวเวอร์จากทุกบัสโดยรวมบัสอ้างอิงในการคำนวณด้วย ดังสมการ (3.26)

$$F_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^N P_i \quad \text{โดยที่ } N = \text{จำนวนบัสทั้งหมดของระบบ} \quad (3.26)$$

3.5 การหาผลเฉลยของออปติมอลพาวเวอร์โฟลว์

3.5.1 ลำดับการคำนวณ

ดังได้อธิบายในหัวข้อที่แล้ว การหาผลเฉลยของออปติมอลพาวเวอร์โฟลว์สามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังโฟลว์ชาร์ทในหัวข้อ 3.6 (รูปที่ 3.3) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. กำหนด Iteration counter $k = 0$ และเลือกค่าเริ่มต้นสำหรับ Power Flow
2. หาผลเฉลยของ Power Flow เพื่อกำหนดค่าตัวแปรสแตท
3. หาผลเฉลยของออปติมอลพาวเวอร์โฟลว์ สมการ (3.10) หัวข้อ 3.4 โปรแกรมเชิงเส้นสามารถได้นำมาใช้สำหรับการนี้ (ดูหัวข้อ 3.5.2)
4. ปรับค่าตัวแปร $x^{k+1} = x^k + \Delta x$ และกำหนดค่าตัวนับ $k = k + 1$
5. ตรวจสอบค่า x ที่ได้จากขั้นที่ 4 ว่าสอดคล้องกับเงื่อนไขความออปติมอลของ Karush-Kuhn-Tucker สมการ (3.12) หัวข้อ 3.4 หรือไม่ ถ้าไม่ให้กลับไปทำขั้นที่ 2 ถ้าสอดคล้องให้หยุดการคำนวณ

3.5.2 รายละเอียดสำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรมเชิงเส้น

ด้วยความสามารถของโปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ปัญหาวออปติมอลพาวเวอร์โฟลว์ดังที่ได้อธิบายในบทนำ ฟังก์ชันเป้าหมายมีการประมาณค่าในลักษณะเชิงเส้นในสมการ (3.27) โดยสมการและอสมการข้อกำหนดทั้งหมดถูกประมาณค่าแบบเชิงเส้นเช่นกัน สมการ (3.18) ถือเป็นข้อกำหนดสูตรสำหรับโปรแกรมเชิงเส้น และจากจุดนี้ การหาผลเฉลยของลำดับการคำนวณที่ 3 ของหัวข้อ 3.5.1 จะกลายเป็นปัญหาของโปรแกรมเชิงเส้นดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 4 ส่วนโฟลว์ชาร์ทลำดับของการคำนวณจะอธิบายในหัวข้อ 3.6

$$\text{Minimize } F(x) = c^T x \quad (3.27)$$

$$\text{subject to : } J_g(x^k)\Delta x = 0$$

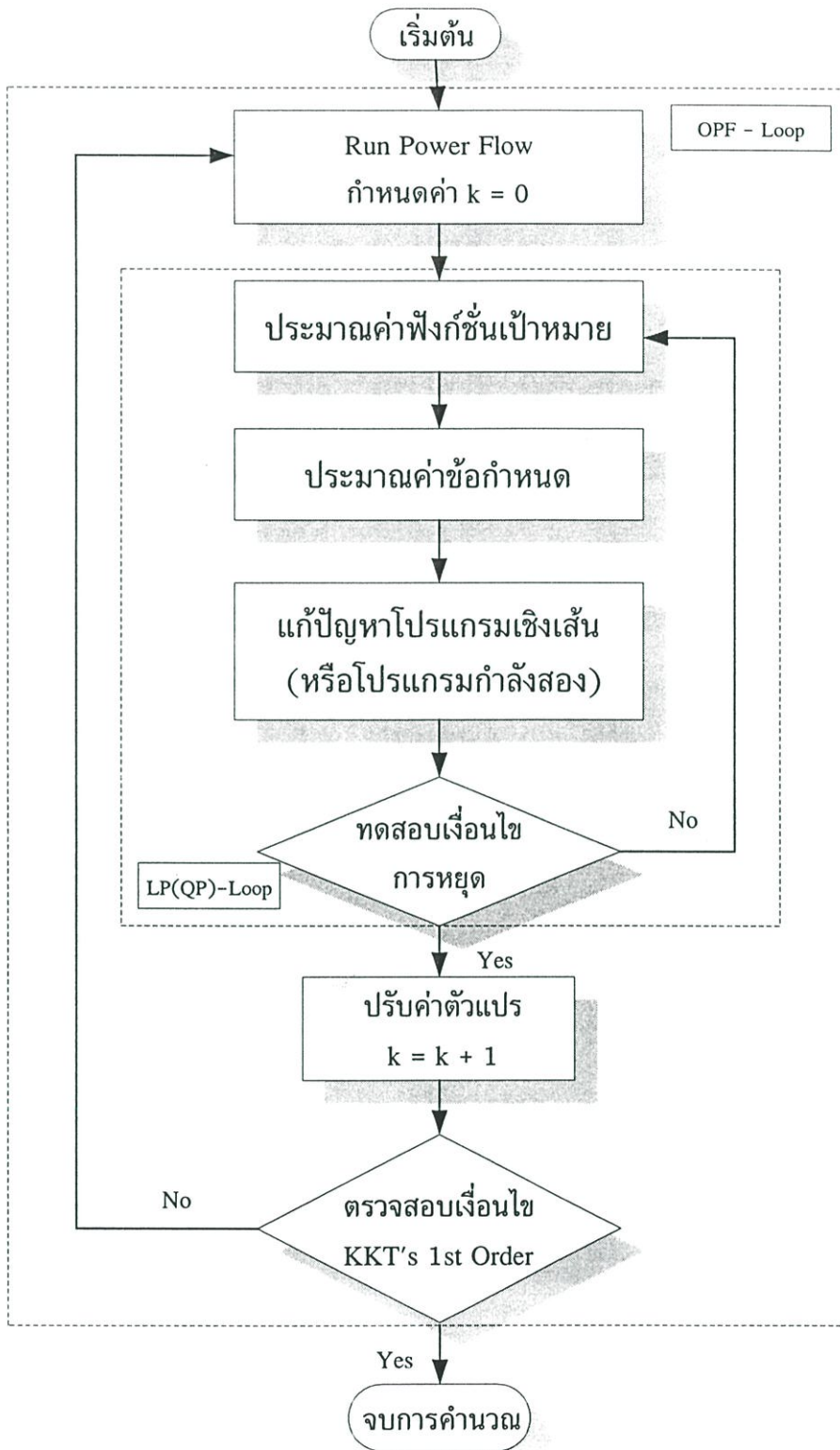
$$\Delta h^{\min} \leq J_h(x^k)\Delta x \leq \Delta h^{\max}$$

$$\Delta x^{\min} \leq \Delta x \leq \Delta x^{\max}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } J_g &= \frac{\partial g(x)}{\partial x}, & J_h &= \frac{\partial h(x)}{\partial x} \\ \Delta h^{\min} &= h^{\min} - h(x^k), & \Delta h^{\max} &= h^{\max} - h(x^k) \\ \Delta x^{\min} &= x^{\min} - x^k, & \Delta x^{\max} &= x^{\max} - x^k \end{aligned}$$

3.6 สรุป

การพัฒนาออปติมอลพาวเวอร์โพลว์เริ่มต้นเป็นครั้งแรกในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 โดยเริ่มจากการสั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน จนกลายเป็นส่วนสำคัญในงานการวางแผนและการดำเนินการของระบบกำลังไฟฟ้า สำหรับคำจำกัดความ ออปติมอลพาวเวอร์มีความหมายเป็นการหาค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันเป้าหมายที่สามารถพิจารณาได้สองแบบ คือ ต้นทุนการผลิตโดยรวมและความสูญเสียโดยรวมของระบบกำลังไฟฟ้า ซึ่งสำหรับกิจการไฟฟ้าที่ดำเนินการในลักษณะธุรกิจแข่งขัน ต้นทุนการผลิตโดยรวมของระบบจะถูกใช้เป็นฟังก์ชันเป้าหมาย และผลเฉลยที่ได้ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขความออปติมอลอันดับที่ 1 ของ Karush-Kuhn-Tucker อย่างเคร่งครัด โดยข้อกำหนดและขีดจำกัดในการดำเนินการต้องถูกพิจารณาเพื่อให้ระบบสามารถดำเนินการในขอบเขตที่ปลอดภัย ทั้งนี้ เราสามารถจำแนกระเบียบวิธีของการหาผลเฉลยออกเป็นสองรูปแบบ [19] โดยรูปแบบแรกคำนวณ Power Flow และออปติไมเซชันแยกกัน ที่เรียกว่า Class A ในขณะที่รูปแบบที่สอง Power Flow จะถูกตรึงเป็นส่วนหนึ่งในสมการข้อกำหนดของปัญหา ที่เรียกว่า Class B เนื่องจากความเหมาะสมกับระบบสมการขนาดใหญ่ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ Class A ที่ขั้นตอนการหาผลเฉลยสามารถพิจารณาได้เป็นสองส่วนหลัก ประกอบด้วยการคำนวณของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์และโปรแกรมเชิงเส้น โดยรายละเอียดและภาพประกอบแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลำดับขั้นตอนการหาผลเฉลยของปัญหาออปติโมลพาวเวอร์โพลาร์ รูปแบบ Class A

บทที่ 4

เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point

สำหรับโปรแกรมเชิงเส้น

4.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

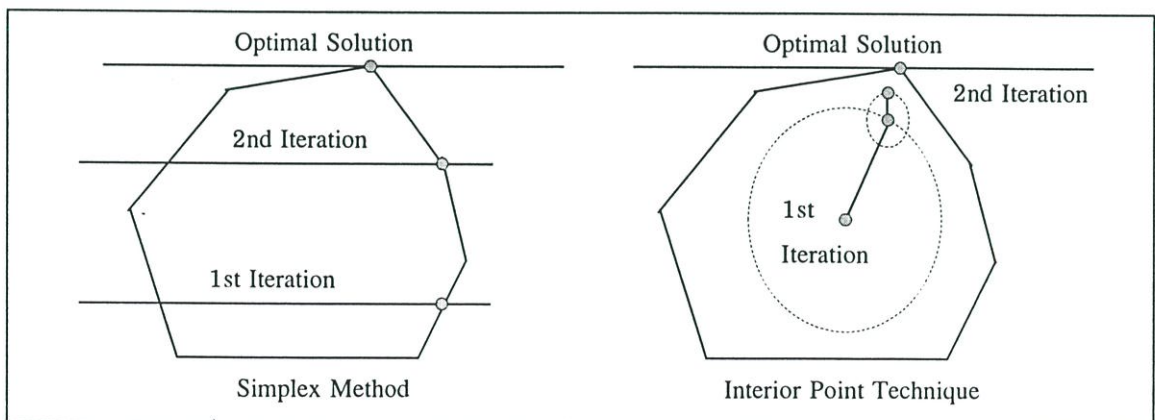
โปรแกรมเชิงเส้นมีการกล่าวถึงครั้งแรกในทศวรรษที่ 1940 [26] โดยได้ใช้เพื่อหาผลเฉลยที่ดีที่สุดของปัญหาที่มีฟังก์ชันเป้าหมายและข้อกำหนดในลักษณะเชิงเส้น และมีการนำโปรแกรมเชิงเส้นไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็น การจัดสรรทุนและทรัพยากร การควบคุมบัญชีราย การสินค้า การจัดการหลักทรัพย์การลงทุน การกำหนดตารางการผลิต และการกำหนดตารางเกี่ยวกับ ลูกเรือ โดยงานทั้งหมดเหล่านี้ ได้ใช้ระเบียบวิธี Simplex เป็นเครื่องมือในการหาผลเฉลย สำหรับงานทางด้านระบบกำลังไฟฟ้า มีการนำโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้เป็นครั้งแรก ในทศวรรษที่ 1960 [27-28] เพื่อทำการกำหนดตารางการเดินเครื่องให้เกิดประโยชน์สูงสุดในทางเศรษฐศาสตร์ และจากนั้นก็มีการ วิจัยและพัฒนาเรื่อยมา จนกระทั่งปี ค.ศ. 1984 Narendra Karmarkar [29] ได้ตีพิมพ์บทความเพื่อ แนะนำระเบียบวิธี Interior Point ซึ่งได้กลายเป็นจุดเปลี่ยนแปลงสำคัญสำหรับการหาผลเฉลยของ โปรแกรมเชิงเส้น วิธีการนี้มีความแตกต่างจากระเบียบวิธี Simplex อย่างชัดเจน โดยกระบวนการหา ผลเฉลยสำหรับแต่ละรอบของการคำนวณอยู่ภายในและไม่สัมผัสขอบข้อกำหนดของปัญหา ในขณะที่ ระเบียบวิธี Simplex มุ่งหาผลเฉลยโดยเดินทางไปตามขอบของข้อกำหนดและถือว่าผลเฉลยอยู่บน ขอบของข้อกำหนดเพียงเท่านั้น ระเบียบวิธี Interior Point ได้มีการนำเข้ามาใช้ในระบบกำลังไฟฟ้า ครั้งแรกในปลายทศวรรษที่ 1980 โดยเริ่มจากปัญหา State estimation เป็นงานแรก [30]

นับแต่นั้นมา บทบาทวิชาการจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธี Interior Point สำหรับการ แก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่อย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน [30-35] ทั้งนี้ โดยมีจุดมุ่งหมายเดียวกันเพื่อปรับปรุงความสามารถในการแก้ปัญหาของโปรแกรมเชิงเส้น James A. Mohmo และคณะ [36-37] ได้กล่าวถึงการพัฒนาระเบียบวิธีต่างๆ ในการแก้ปัญหาของออปติมอล พาวเวอร์โพลว์ ในบทความของพวกเขาทั้งตอนที่ 1 และตอนที่ 2 และได้สรุปในส่วนท้ายของบทความ ตอนที่ 2 ให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรมเชิงเส้น โดยสรุปว่า โปรแกรมเชิงเส้นมีความเหมาะสม สำหรับการแก้ปัญหาในระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ส่วนระเบียบวิธี Interior Point ช่วยให้เข้าถึงผลเฉลย เร็วขึ้น โดยส่วนมากเป็นการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นในลักษณะ Primal-dual Interior point ที่มีการคำนวณ Primal problem และ Dual problem พร้อมกันโดยมุ่งลดระยะห่างระหว่างสองปัญหา ส่วนเทคนิค Predictor-corrector ก็เข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดจำนวนรอบการคำนวณ [38-40] โดยที่การคำนวณยังคงอยู่ภายในขอบเขตของปัญหา

เราสามารถสรุปข้อดีของเทคนิค Predictor-corrector primal-dual interior point ที่มีต่อการหาผลเฉลยของโปรแกรมเชิงเส้น โดยเปรียบเทียบกับเทคนิคเดิม (วิธี Simplex) ดังนี้

- เวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยกว่าเนื่องจากมีลักษณะเป็น Polynomial-time algorithm ในขณะที่วิธี Simplex มีลักษณะเป็น Exponential-time algorithm
- แม้ว่าจะมีการคำนวณที่ซับซ้อนกว่าแต่ใช้จำนวนรอบการคำนวณที่น้อยกว่า
- จำนวนรอบการคำนวณมิได้ขึ้นกับขนาดของระบบสมการของโปรแกรมเชิงเส้น
- เทคนิค Predictor-corrector เข้ามาช่วยลดจำนวนรอบการคำนวณ โดยส่วน Predictor ช่วยให้การคำนวณก้าวไปสู่จุดออปติมอลเร็วยิ่งขึ้น ในขณะที่เดียวกัน Corrector จะช่วยควบคุมให้การคำนวณยังคงอยู่ภายในขอบเขตของปัญหา
- มีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาของระบบสมการขนาดใหญ่

ข้อดีของเทคนิค Predictor-corrector primal-dual interior point ดังกล่าวด้านบนนี้ มีข้อที่สำคัญที่สุด คือ ข้อที่ 3 จำนวนรอบการคำนวณที่ไม่ขึ้นกับขนาดของระบบ อาทิเช่น ปัญหาที่มีสมการข้อกำหนดกว่า 10,000 สมการ เทคนิคนี้ใช้รอบการคำนวณต่ำกว่า 100 รอบ ในขณะที่ วิธี Simplex ใช้รอบการคำนวณมากกว่า 20,000 รอบ ส่วนมูลเหตุที่เรียกว่า Interior point นั้น เนื่องมาจาก การหาผลเฉลยของเทคนิค Interior point ดำเนินอยู่ภายในขอบเขตของปัญหา โดยเริ่มจากจุดเริ่มต้นภายในขอบเขตของปัญหาและมองหาคู่จุดออปติมอลโดยการกราดมองเป็นรูปวงรี จากนั้นก็มองหาคู่จุดออปติมอลใหม่โดยการกราดมองเป็นรูปวงรีที่มีขนาดเล็กลง ทำซ้ำจนกว่าวงรีจะมีขนาดเล็กจนเป็นที่พอใจและถือว่าจุดออปติมอลที่ได้เป็นผลเฉลย สำหรับวิธี Simplex เป็นการหาคู่จุดออปติมอลโดยวิ่งไปตามเส้นขอบของปัญหาเพียงเท่านั้น ซึ่งสำหรับบางปัญหาอาจมีใช้จุดออปติมอลที่แท้จริงก็ได้



รูปที่ 4.1 การเดินทางเข้าสู่จุดออปติมอลของเทคนิค Interior point และ Simplex

4.2 Primal Problem และ Dual Problem

สำหรับการผลเฉลยของออปติมอลพาวเวอร์โพล์ด้วยโปรแกรมเชิงเส้น (ดูหัวข้อ 3.5.2) โดยปกติหลังจากการประมาณค่าในลักษณะเชิงเส้น สมการคณิตศาสตร์รูปแบบมาตรฐานสำหรับโปรแกรมเชิงเส้นแสดงในสมการที่ (4.1) เราเรียกสมการนี้ว่า Primal problem [26][35]

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & c^T x \\ \text{Subject to} \quad & Ax = b \\ & x + s = u \\ & x, s \geq 0 \end{aligned} \tag{4.1}$$

โดยที่ $c, x, s, u \in R^n, b \in R^m, A \in R^{m \times n}$

สำหรับการแก้ปัญหาแบบ Primal-Dual Interior Point ได้มีการนิยาม Dual problem ขึ้นเพื่อการคำนวณแบบขนาน โดยสมการคณิตศาสตร์ของ Dual problem แสดงในสมการที่ (4.2)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & b^T y - u^T w \\ \text{Subject to} \quad & A^T y + z - w = c \\ & z, w \geq 0 \end{aligned} \tag{4.2}$$

โดยที่ $z, w \in R^n, y \in R^m$

การคำนวณจะเข้าถึงจุดออปติมอลเมื่อค่าความแตกต่างระหว่าง Primal และ Dual problem มีค่าน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ (Specific tolerance) ค่าความแตกต่างระหว่างสองปัญหานี้ในบางครั้งเรียกว่าระยะห่างระหว่างฟังก์ชันเป้าหมายของ Primal และ Dual problem เรานิยามเป็น Duality gap $c^T x - b^T y$ และสามารถใช้เป็นเงื่อนไขในของออปติมอลได้ ดังแสดงในสมการที่ (4.3)

$$|c^T x - b^T y| / \text{Max}\{1, |c^T x|\} \leq \varepsilon \tag{4.3}$$

หาก x^* แทนผลเฉลย ณ จุดออปติมอลของ Primal problem และ y^* แทนผลเฉลย ณ จุดออปติมอลของ Dual problem แล้ว ฟังก์ชันเป้าหมายของปัญหาทั้งสองจะมีค่าเท่ากันซึ่งนั่นหมายถึง $c^T x^* = b^T y^*$ และเพื่อให้การหาผลเฉลยของ Primal และ Dual problem สะดวกและมีลักษณะของระบบสมการเชิงเส้นโดยต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขความออปติมอลอันดับที่ 1 ของ KKT จึงมีการนำเอาฟังก์ชันลากรองเจียนมาใช้ โดยจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไป

4.3 ฟังก์ชันลากรองเงียนและการกำหนด Newton Direction

ฟังก์ชันลากรองเงียนสำหรับการหาผลเฉลยของโปรแกรมเชิงเส้นด้วยเทคนิค Primal-Dual Interior Point แสดงด้วยสมการที่ (4.4) [26,35]

$$L(x, s, \mu) = c^T x - \mu \sum_{j=1}^n \ln x_j - \mu \sum_{j=1}^n s_j \quad (4.4)$$

โดยที่ μ คือ Barrier parameter ทำหน้าที่ไม่ให้เกิดการคำนวณออกนอกขอบเขตของปัญหา

ส่วนเงื่อนไขความออปติมอลอันดับที่ 1 ของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) มีสมการคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการที่ (4.5)

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ x + s &= u \\ A^T y + z - w &= c \\ XZe &= \mu e \\ SWe &= \mu e \end{aligned} \quad (4.5)$$

โดยที่ X, S, Z, W คือ Diagonal Matrix ที่มีสมาชิกเป็น x_j, s_j, z_j, w_j
ส่วน e คือเวกเตอร์ที่มีสมาชิกเป็น 1 ทั้งหมด และ μ คือ barrier parameter

เนื่องจากการหาผลเฉลยของระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำได้โดยการประมาณค่าที่เรียกว่า วิธี Newton เช่นกัน การกำหนดทิศทางในการหาผลเฉลยของสมการที่ (4.5) จึงเรียกว่าการกำหนด Newton Direction ดังแสดงในสมการที่ (4.6)

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & A^T & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta s \\ \Delta z \\ \Delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b - Ax \\ u - x - s \\ c - A^T y - z + w \\ \mu e - XZe \\ \mu e - SWe \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

การหาผลเฉลยของโปรแกรมเชิงเส้นที่ใช้เทคนิค Primal-Dual Interior Point ในทุกรอบการคำนวณ จำเป็นต้องมีการแก้สมการที่ (4.6) เพื่อกำหนด Newton Direction เพื่อปรับค่าตัวแปร

การกำหนด Newton Direction เป็นการชี้ทิศทางไปสู่จุดออปติมอลสำหรับรอบการคำนวณนั้นและกลายจุดเริ่มต้นสำหรับรอบการคำนวณใหม่ ทั้งนี้ การเส้นทางไปยังจุดออปติมอลจะอยู่ภายในขอบเขตปัญหาเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากสมการที่ (4.6) ค่า $\Delta x, \Delta y, \Delta s, \Delta z, \Delta w$ ที่ได้จะนำไปใช้เพื่อการปรับค่าตัวแปร x, y, s, z, w ต่อไป ดังสมการที่ (4.7)

$$\begin{aligned}x^{k+1} &= x^k + \alpha_0 \alpha_p \Delta x \\s^{k+1} &= s^k + \alpha_0 \alpha_p \Delta s \\y^{k+1} &= y^k + \alpha_0 \alpha_D \Delta y \\z^{k+1} &= z^k + \alpha_0 \alpha_D \Delta z \\w^{k+1} &= w^k + \alpha_0 \alpha_D \Delta w\end{aligned}\tag{4.7}$$

โดยที่ α_0 คือ Step reduction factor

α_p และ α_D คือ Maximum step size สำหรับ Primal และ Dual Problem

4.4 เทคนิค Predictor – Corrector

ผลเฉลยของสมการ KKT matrix สมการที่ (4.6) ถือเป็นเวกเตอร์ที่ใช้กำหนดทิศทางไปยังจุดออปติมอล หรือเรียกว่า Newton Direction และประมาณร้อยละ 60–90 ของเวลาทั้งหมดในการคำนวณเสียไปกับการหาผลเฉลยของสมการนี้ ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาเทคนิค Predictor – Corrector เข้ามาเพื่อลดจำนวนรอบการคำนวณ ซึ่งนั่นหมายถึง การลดระยะเวลาในการคำนวณนั่นเอง [33] หลักการของเทคนิค Predictor – Corrector คือ การแยกเวกเตอร์กำหนดทิศทาง (แทนด้วยสัญลักษณ์ Δ) ออกเป็นสองส่วนประกอบด้วย ส่วน Affine-scaling component และ ส่วน Centering component (แทนด้วยสัญลักษณ์ Δ_A และ Δ_C ตามลำดับ) ดังแสดงในสมการที่ (4.8)

$$\Delta = \Delta_A + \Delta_C\tag{4.8}$$

โดยที่ Δ_A คือ Affine-scaling component (Predictor term)

Δ_C คือ Centering component (Corrector term)

จากสมการที่ (4.8) ส่วน Affine-scaling component มีหน้าที่ลดค่าความแตกต่างระหว่าง Primal และ Dual problem และเพิ่มระยะการก้าวไปสู่ผลเฉลยให้มีความยาวมากยิ่งขึ้น ซึ่งถือเป็นส่วนที่ช่วยลดจำนวนรอบการคำนวณ ในขณะที่ส่วน Centering component มีหน้าที่ปรับลดไม่ให้ผลเฉลยของแต่ละรอบการคำนวณออกไปนอกขอบเขตของปัญหา

ส่วน Affine-scaling component สามารถหาได้จากการแทนค่า $\mu = 0$ ในด้านขวามือของสมการที่ (4.6) ดังแสดงในสมการที่ (4.9)

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & A^T & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_A \\ \Delta y_A \\ \Delta s_A \\ \Delta z_A \\ \Delta w_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b - Ax \\ u - x - s \\ c - A^T y - z + w \\ -XZe \\ -SWe \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

ส่วน Centering component สามารถหาได้จากการแทนค่าด้านขวามือของสมการที่ (4.6) ด้วยเวกเตอร์ $(0, 0, 0, \mu e - \Delta X_A \Delta Z_A e, \mu e - \Delta S_A \Delta W_A e)^T$ ดังแสดงในสมการที่ (4.10)

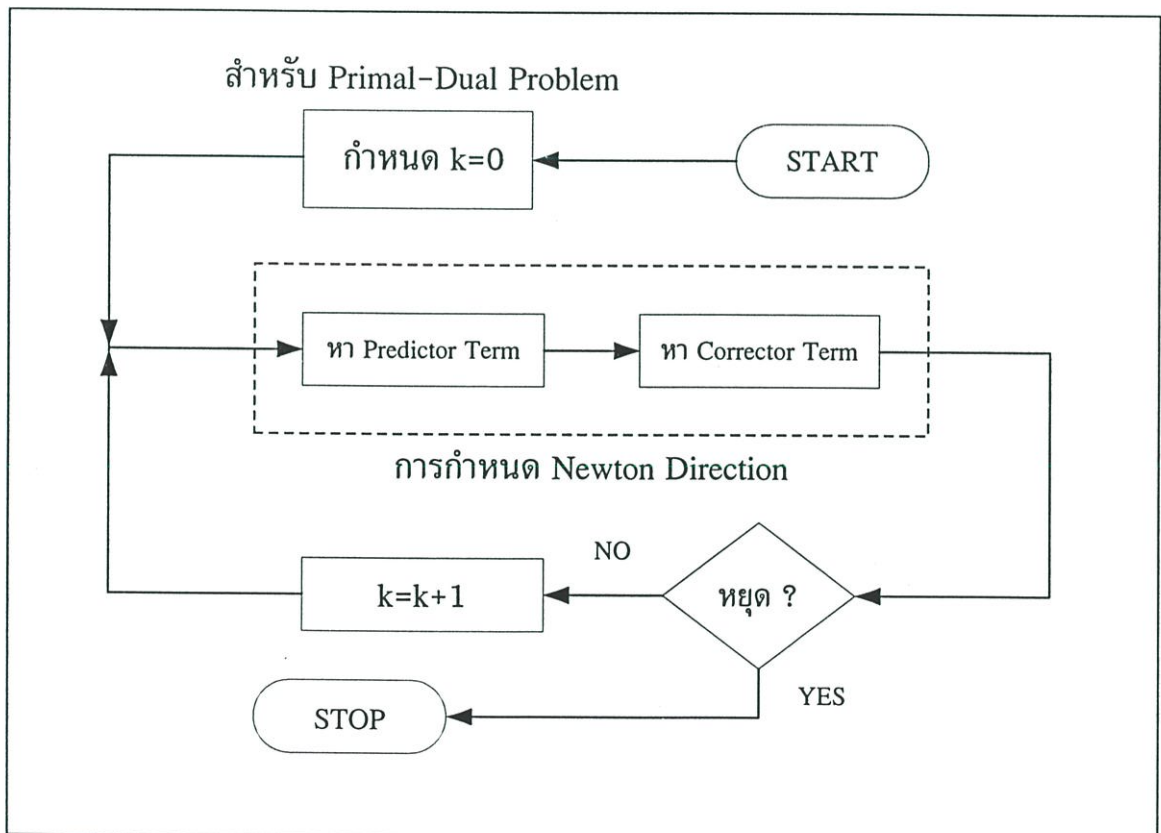
$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & A^T & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_C \\ \Delta y_C \\ \Delta s_C \\ \Delta z_C \\ \Delta w_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mu e - \Delta X_A \Delta Z_A e \\ \mu e - \Delta S_A \Delta W_A e \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

หลังจากใช้เทคนิค Predictor - Corrector เพื่อการกำหนด Newton Direction ตามสมการที่ (4.9-4.10) และทำการปรับค่าตัวแปรตามสมการที่ (4.7) แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบเงื่อนไขการออกปติมอลตามสมการที่ (4.3)

ขั้นตอนสำหรับการหาผลเฉลยของโปรแกรมเชิงเส้นด้วยเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point ได้สรุปเป็นโฟลว์ชาร์ทในหัวข้อที่ 4.5 (ดูรูปที่ 4.2)

4.5 สรุป

โปรแกรมเชิงเส้นเกิดขึ้นครั้งแรกในทศวรรษที่ 1940 และได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการแก้ปัญหาสำหรับงานหลายด้าน ในทศวรรษที่ 1960 ได้มีการนำโปรแกรมเชิงเส้นเข้ามาใช้ในงานด้านระบบกำลังไฟฟ้าเพื่อทำการกำหนดตารางการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในทางเศรษฐศาสตร์ และจากนั้น งานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่เรื่อยมา จนกระทั่งปี ค.ศ. 1984 Narendra Kamarkar ได้แนะนำเทคนิค Interior Point ซึ่งได้กลายเป็นจุดเปลี่ยนแปลงสำคัญสำหรับการหาผลเฉลยของโปรแกรมเชิงเส้นที่แตกต่างจากวิธี Simplex โดยสิ้นเชิง ทั้งนี้ James A. Momoh และคณะ ได้สรุปให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรมเชิงเส้นและเทคนิค Interior Point ในตอนท้ายของบทความของพวกเขา Primal และ Dual Problem สำหรับการหาผลเฉลยของโปรแกรมเชิงเส้นด้วยเทคนิค Interior Point ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2 ฟังก์ชันลากรองเงียนและการกำหนด Newton Direction ได้อธิบายในหัวข้อ 4.3 ส่วนเทคนิค Predictor-Corrector เพื่อลดจำนวนรอบการคำนวณได้อธิบายในหัวข้อ 4.4 และขั้นตอนการหาผลเฉลยของโปรแกรมเชิงเส้นด้วยเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point สรุปเป็นโฟลว์ชาร์ตดังแสดงในรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการหาผลเฉลยด้วยเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point

บทที่ 5

การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า

5.1 ความสำคัญ

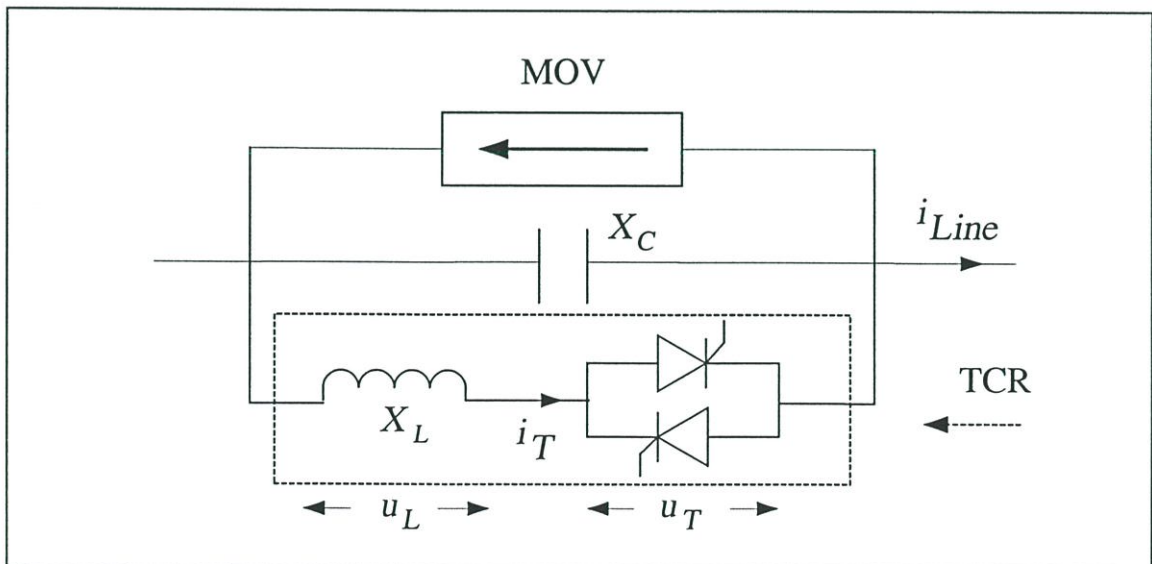
การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรับภาระของสายส่งไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า [41-42] และเทคโนโลยี Flexible AC Transmission System (FACTS) เป็นแนวทางหนึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว บทความวิชาการที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ FACTS มีการเผยแพร่เป็นจำนวนมาก งานวิจัยและพัฒนาทางด้านนี้จึงมีมาอย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์ FACTS สามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภทด้วยกันโดยพิจารณาจากหลักการทำงาน [43] ดังได้อธิบายแล้วในบทที่ 1 คุณสมบัติของอุปกรณ์ FACTS ในหลายรูปแบบได้มีการกล่าวถึงในบทความของ Ch. Schaffner และ G. Andersson [44] และหากมีการควบคุมที่เหมาะสม อุปกรณ์ FACTS จะเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อระบบกำลังไฟฟ้าอย่างมาก อาทิเช่น การควบคุม Power Flow การปรับลด Power Swing การเพิ่ม Transient Stability และการลด Subsynchronous Resonance เป็นต้น [45-46]

การพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์ FACTS บนสายส่งไฟฟ้า [47] มีได้หลายวิธีตามวัตถุประสงค์สำคัญ ไม่ว่าจะเป็น เพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า [48] เพื่อการจัดการความคับคั่งบนสายส่งไฟฟ้า [49] หรือ เพื่อความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม [50] สำหรับกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขันดังได้อธิบายในบทที่ 3 ราคาค่าไฟฟ้าคำนวณจากหลายส่วนประกอบ โดยราคาตลาดของไฟฟ้าถือเป็นส่วนที่มีบทบาทสูงสุด ความแตกต่างของราคาตลาดเป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้ อันเนื่องมาจากต้นทุนจากความสูญเสียและต้นทุนจากความคับคั่งบนสายส่งไฟฟ้า โดยนัยของความหมายทางเศรษฐศาสตร์ ความแตกต่างอันนี้เท่ากับต้นทุนการจัดส่งกำลังไฟฟ้า [51] ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับบริเวณใกล้เคียงที่ไม่ควรปล่อยให้มีความแตกต่างกันมากนัก ความพยายามที่จะปรับลดความแตกต่างอันนี้สำหรับบริเวณใกล้เคียงจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ บทความทางวิชาการบางฉบับได้อธิบายและแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) บนสายส่งไฟฟ้าสามารถปรับลดราคาตลาดและความแตกต่างของราคาตลาดของไฟฟ้าลงได้ โดยอุปกรณ์ TCSC สามารถแทนค่าด้วย Capacitor หรือ Reactor ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ jX_C [50] ทั้งนี้ ข้อดีที่สำคัญคือ การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ทำให้สายส่งไฟฟ้าสามารถภาระได้ถึงพิกัดความร้อน ในบทนี้ จะอธิบายถึงส่วนประกอบและหลักการทำงานของอุปกรณ์ TCSC รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้า ค่าความต่างของราคาตลาดของไฟฟ้าและการพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ตลอดจนการหาค่า Sensitivity of line flow to the series compensation [45] ในตอนท้ายด้วย

5.2 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

อุปกรณ์ TCSC เป็นอุปกรณ์ FACTS ประเภทอนุกรมอันแรกที่มีการพัฒนาขึ้น โดยมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีส่วนควบคุมหลักเรียกว่า Thyristor Controlled Reactor (TCR) ส่วนนี้สามารถพิจารณาเป็น Static Var Controller โดยการใช้การเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุมรีแอกทีฟพาวเวอร์อย่างรวดเร็ว ส่วนสำคัญอีกอันที่สามารถควบคุมได้คือ ตัวเหนี่ยวนำ ที่ได้กำหนดค่าคงที่ไว้ และต่ออนุกรมกับ Bipolar Thyristor Switch และด้วยวิธีการควบคุมมุม Firing Angle ของ Thyristor จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของ Effective Inductive Reactance ซึ่งจะทำให้มีการแลกเปลี่ยน Reactive Power ระหว่าง TCR และระบบ อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ Capacitive Var หรือ Inductive Var อาจมีความจำเป็นตามสภาวะและเงื่อนไขของระบบ และเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการเหล่านี้ ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ที่ได้กำหนดให้มีค่าคงที่ไว้ จากรูปที่ 5.1 และเช่นเดียวกัน อุปกรณ์ Metal-oxide Varistor จะต่อขนานอยู่กับ TCR และตัวเก็บประจุ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันปัญหาจากแรงดันเกิน

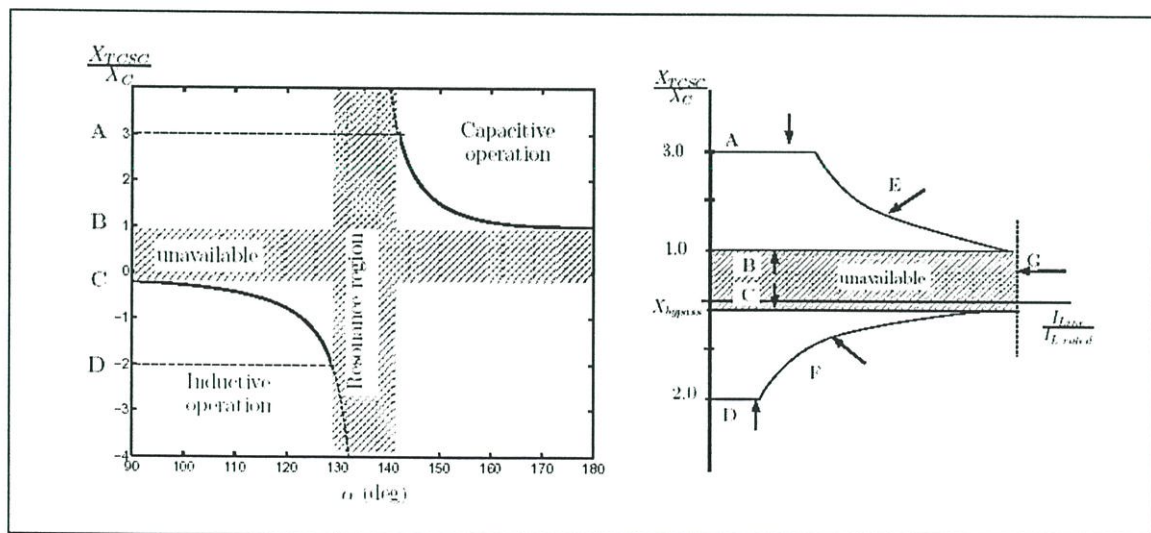
หลักการเบื้องต้น คือ การปรับค่า Apparent line impedance อย่างรวดเร็ว เพื่อให้เป็นไปตามหลักการจำเพาะบางอย่างของระบบ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าสามารถชดเชยได้โดยการควบคุมค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ TCSC อันจะเป็นผลให้ Power Flow บนสายส่งไฟฟ้าเส้นทางดังกล่าวนี้มีค่าเพิ่มมากขึ้น รูปแบบการชดเชยแบบอนุกรมในอดีต สามารถทำได้จริงด้วยการสวิตช์ตัวเก็บประจุ แต่อย่างไรก็ตาม การสวิตช์ทางกลเองก็ยังมีผลให้มีการควบคุมที่ช้าและไม่ราบเรียบ การควบคุมด้วย Thyristor ได้ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าเป็นไปอย่างรวดเร็วและราบเรียบ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และควบคุม Power Flow สำหรับสายส่ง



รูปที่ 5.1 โมดูลของอุปกรณ์ TCSC ต่อเฟส

ไฟฟ้าในบางเส้นทาง รูปแบบของอุปกรณ์ TCSC ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ระดับของการชดเชยแบบอนุกรมสามารถควบคุมโดยการเพิ่มหรือการลดช่วงเวลาการนำของ Thyristor ซึ่งหมายถึงกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่าน TCR มุม Firing angle α ของ TCR ได้นิยามเป็นมุมที่มีหน่วยเป็นองศาทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวมัน โดยทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า พิจารณา ณ จุดตัดศูนย์ที่มีลักษณะการเพิ่มไปยังส่วนที่เป็นค่าบวก (Positive-going zero-crossing) มุม Firing angle ที่ต่ำกว่า 90 องศา จะไม่สามารถควบคุมกระแสของตัวเหนี่ยวนำ และไม่อนุญาตให้มุม Firing angle มีค่ามากกว่า 180 องศา เนื่องจาก Thyristor ทั้งคู่ต้องทำงานอย่างสมมาตรต่อกัน

รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะสมบัติในสภาวะคงตัวของรีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC อันเนื่องมาจากมุม Firing angle โดยค่า $\rho = 2.06$ สำหรับช่วงที่อุปกรณ์ TCSC ทำงานต่อเนื่อง ($\alpha = 90^\circ$) เรียกว่า Thyristor bypassed mode ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์สุทธิเทบจะมีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ($|X_L| \ll |X_C|$) สำหรับช่วงที่ $\alpha = 180^\circ$ ถือเป็นการบล็อกการทำงาน เรียกว่า การทำงานในช่วง Thyristor blocked mode ค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ TCSC มีค่าเท่ากับรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ นอกจากนี้อุปกรณ์ TCSC สามารถควบคุมอย่างต่อเนื่องได้ ซึ่งเรียกว่า Vernier control mode ทั้งในช่วงอินดักทีฟ ($90^\circ \leq \alpha \leq 129^\circ$) และคาปาซิทีฟ ($142^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$) โดยต้องเลี่ยงการทำงานในช่วงเรโซแนนซ์ สำหรับช่วงคาปาซิทีฟ อุปกรณ์ TCSC สามารถควบคุมให้มีค่ารีแอกแตนซ์เท่าใดก็ได้ ตั้งแต่ $1.0X_C$ จนถึง $3.0X_C$ และในช่วงอินดักทีฟตั้งแต่ $X_{bypass} (< 0)$ จนถึง $-2.0X_C$ ทั้งนี้ ด้วยปัญหาเรื่องช่วงเรโซแนนซ์ ค่า X_{TCSC} ของอุปกรณ์ TCSC แบบโมดูลเดี่ยว จึงไม่สามารถมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.0 และ $1.0X_C$ ได้



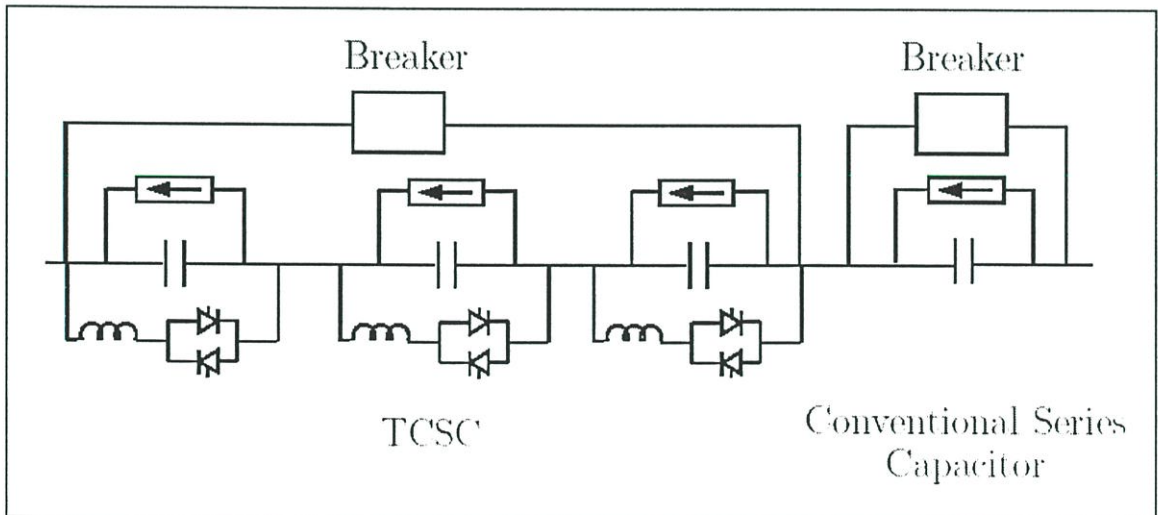
รูปที่ 5.2 ลักษณะสมบัติของ X_{TCSC} / X_C ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามมุมของ Thyristor ใน TCR

รูปที่ 5.3 ลักษณะสมบัติของ X_{TCSC} / X_C ในสภาวะคงตัว

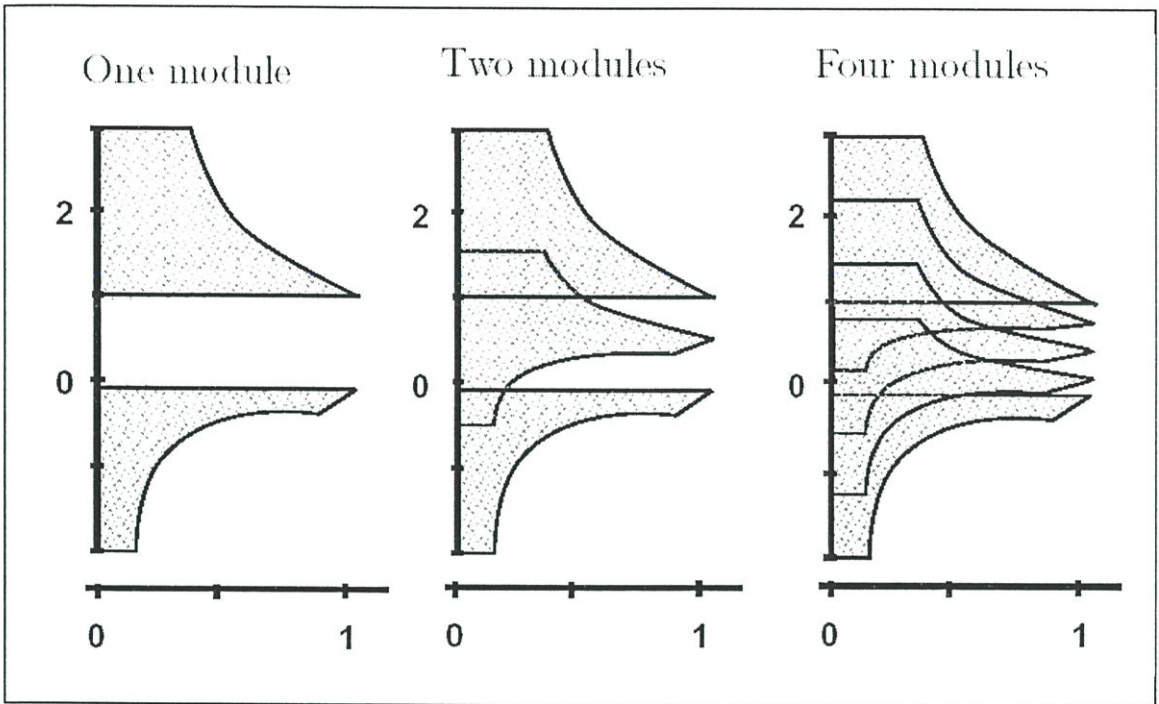
รูปที่ 5.3 แสดงคุณลักษณะของรีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC ในสภาวะคงตัว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส โดยจากรูปได้แสดงข้อจำกัดทั้งทางกายภาพและการทำงานอันมีต่อค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ TCSC โดยที่ :

- A , D : ข้อจำกัดอันเนื่องมาจากบริเวณเรโซแนนซ์
- B : ข้อจำกัดอันเนื่องจากมุม Firing angle ($\alpha = 180^\circ$, Thyristor blocked mode)
- C : ข้อจำกัดอันเนื่องจากมุม Firing angle ($\alpha = 90^\circ$, Thyristor bypassed mode)
- E , F : ข้อจำกัดบนของแรงดันไฟฟ้าสำหรับการทำงานในช่วงอินดักทีฟและคาปาซิทีฟ
- G : กระแสสูงสุดของอุปกรณ์ TCSC ที่สามารถมีได้สำหรับการทำงานอย่างต่อเนื่อง

โดยมาตรฐาน การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่มีการควบคุมจะประกอบด้วยสองส่วน (พิจารณารูปที่ 5.4) เนื่องจากการพิจารณาเรื่องต้นทุน ส่วนหนึ่งจะเป็นตัวเก็บประจุแบบอนุกรมแบบเดิมที่มีการสวิตช์เชิงกล ในขณะที่ส่วนที่สองควบคุมโดย Thyristor โดยปกติ ส่วนที่ควบคุมโดย Thyristor จะประกอบด้วยโมดูลของอุปกรณ์ TCSC จำนวนหนึ่ง ที่เชื่อมต่อกันในลักษณะอนุกรม โดยที่แต่ละโมดูลสามารถควบคุมได้อย่างอิสระ ข้อดีที่สำคัญอันหนึ่งของการแยกรีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ TCSC ออกเป็นส่วน ๆ คือ วิธีการนี้ทำให้ได้ค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ TCSC ในช่วงที่กว้างเพิ่มมากขึ้น เพราะว่า ปัญหาอันเนื่องมาจากช่องว่างในการควบคุมที่เคยปรากฏในการทำงานของอุปกรณ์ TCSC แบบโมดูลเดี่ยวได้หมดไปสำหรับแบบหลายโมดูล ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 โครงร่างของอุปกรณ์ TCSC



รูปที่ 5.5 คุณลักษณะของอุปกรณ์ TCSC ระหว่าง $X-I$ โดยพิจารณาการเพิ่มจำนวนโมดูล

5.3 การติดตั้งอุปกรณ์ Thyristor-Controlled Series Capacitor บนสายส่งไฟฟ้า

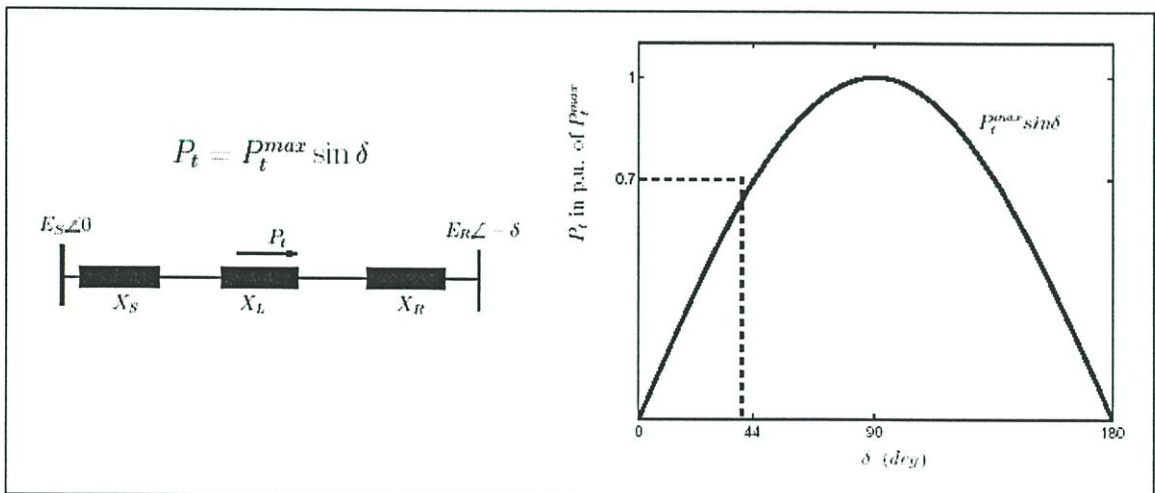
5.3.1 ความสามารถในการรับภาระของสายส่งไฟฟ้า

ความสัมพันธ์เบื้องต้นในการส่งกำลังไฟฟ้ามักมีข้อจำกัดโดยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5.6 จากรูป E_S และ X_S แทนแรงดันไฟฟ้าและรีแอกแตนซ์ของด้านส่ง ในขณะที่ E_R และ X_R แทนแรงดันไฟฟ้าและรีแอกแตนซ์ของด้านรับ ส่วน X_L แทนรีแอกแตนซ์ของสายส่งไฟฟ้า และ δ แทน Transmission angle

ตัวแปรทั้งหมดที่แสดงในรูปที่ 5.6 มีผลกระทบโดยตรงต่อการส่งกำลังไฟฟ้า หากพิจารณาโมเดลแบบอุดมคติที่ใช้สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ส่งจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะค่าไซน์ของมุม Transmission angle และกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสถานะคงตัวมีค่าตามสมการที่ (5.12) ณ มุม Transmission angle ที่ 90 องศา

$$P_t^{\max} = \frac{E_R \cdot E_S}{X_S + X_L + X_R} \quad (5.12)$$

อย่างไรก็ตาม มีตัวประกอบจำนวนมากที่จำกัดความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าบนสายส่งในโครงข่ายที่ซับซ้อน ข้อจำกัดที่เด่นชัดอันหนึ่งคือกระแสไฟฟ้าที่เป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ สำหรับพิกัดการทำงานต่อเนื่อง ค่าของกระแสขึ้นกับพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้า อุณหภูมิแวดล้อม ความเร็วลม ฯลฯ แต่โดยปกติ สำหรับการทำงานอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 5.6 กราฟ Power angle และขอบเขตของเสถียรภาพสำหรับสถานะคงตัว

สายส่งไฟฟ้ามีการใช้งานที่ระดับต่ำกว่าพิกัดความร้อนอย่างมาก ตัวประกอบที่มีความสำคัญสูงสุดในการจำกัดจำกัดการรับภาระของสายส่งไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังนี้

- ข้อจำกัดจากความร้อน
- ข้อจำกัดจากแรงดันไฟฟ้าตก
- ข้อจำกัดจากเสถียรภาพในภาวะคงตัว (Steady-state or small-signal stability)
- ข้อจำกัดจากเสถียรภาพในภาวะทรานเซียน (Transient stability)

โดยปกติ ส่วนต่างอันเกิดจากข้อจำกัดจากแรงดันไฟฟ้าตกมีค่าอยู่ที่ 5 % ในขณะที่ส่วนต่างอันเกิดจากข้อจำกัดจากเสถียรภาพในภาวะคงตัวมีค่าอยู่ที่ 30 % [42] สมการที่แทนส่วนต่างที่เกิดจากข้อจำกัดต่าง ๆ มีดังนี้

$$\text{Stability Margin} = \frac{P_{\max} - P_{\text{limit}}}{P_{\max}} \times 100 \quad (5.13)$$

Prabha Kundur [43] ได้อธิบายถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการรับภาระทางไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า ประกอบด้วย

- ข้อจำกัดจากความร้อน สำหรับสายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวไม่เกิน 80 กิโลเมตร
- ข้อจำกัดจากแรงดันตก สำหรับสายส่งไฟฟ้าที่มีความยาว 80 - 320 กิโลเมตร
- ข้อจำกัดจากเสถียรภาพในภาวะคงตัว สำหรับสายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวมากกว่า 320 กิโลเมตร

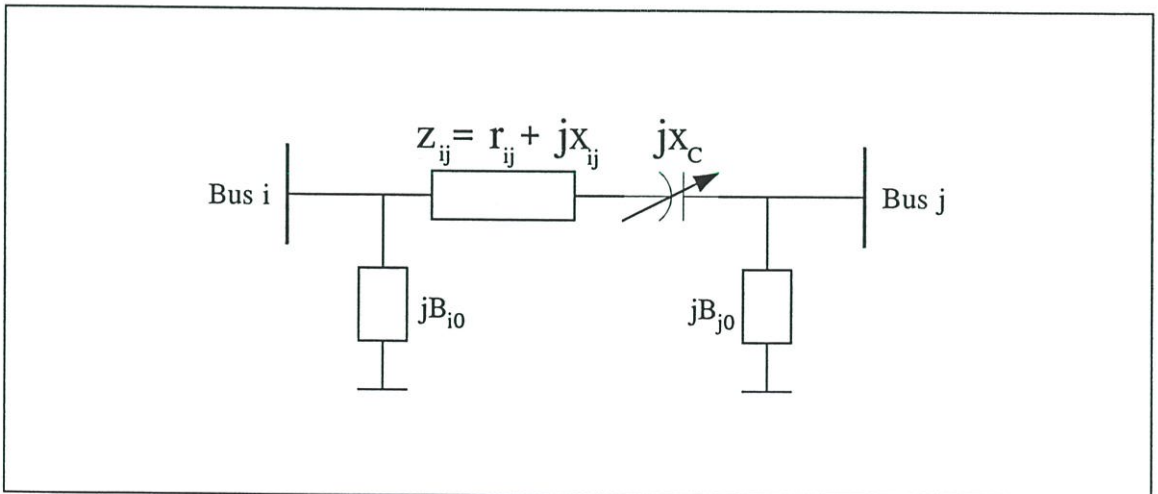
การชดเชยสายส่งไฟฟ้าถือเป็นแนวทางหนึ่งที่ทำให้สายส่งไฟฟ้าสามารถรับภาระทางไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น แต่เพื่อหลีกเลี่ยงกันปัญหาจาก Subsynchronous Resonance การชดเชยสายส่งไฟฟ้าไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 40 % ของรีแอกแตนซ์ของสายส่ง [41] โดยมีค่าสูงสุดที่ 60 % [50] เนื่องจากหากมีการชดเชยมากเกินไป การเปลี่ยนแปลงของขนาดและองศาของแรงดันไฟฟ้าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง Power flow อย่างรุนแรง [42] แนวทางที่น่าสนใจอันหนึ่งในการเพิ่มความสามารถการรับภาระของสายส่งไฟฟ้า คือ การติดตั้งอุปกรณ์ FACTS แบบอนุกรม ซึ่งทำให้สายส่งไฟฟ้าสามารถรับภาระได้มากขึ้นถึงข้อจำกัดจากความร้อนของสายส่งไฟฟ้า [42] [44] [46] [50]

5.3.2 แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้า

การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้า มีความจำเป็นต้องเข้าใจรูปแบบวงจรสมมูลของสายส่งที่มีความแตกต่างกันตามประเภทของสายส่งไฟฟ้า Prabha Kundur [42] ได้ให้คำอธิบายประเภทของสายส่งไฟฟ้าแบบ Over head โดยพิจารณาจากความยาว ดังนี้

- Short lines : สายส่งไฟฟ้าที่มีระยะทางสั้นกว่าประมาณ 80 กิโลเมตร (50 ไมล์), แบบจำลองสามารถตัด Shunt capacitance ออกได้ และสามารถแทนด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรม
- Medium-length lines : สายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวอยู่ในช่วงระหว่าง 80 กิโลเมตร ถึงประมาณ 200 กิโลเมตร (125 ไมล์) สามารถแทนด้วยวงจรสมมูล π
- Long lines : สายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวมากกว่า 200 กิโลเมตร สายส่งประเภทนี้ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ มีความสำคัญมาก และจำเป็นต้องแทนด้วยวงจรสมมูล π อีกทางหนึ่งสายส่งประเภทนี้สามารถแทนได้ด้วยสายส่งระยะสั้นกว่าเชื่อมโยงกัน (cascade) โดยแต่ละช่วงแทนด้วยวงจรสมมูล π

อุปกรณ์ TCSC สามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุหรือรีแอคเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ jX_C [51] การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จึงเป็นการเพิ่มอิมพีแดนซ์ jX_C เข้าไปในแบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า ทั้งนี้ โดยขึ้นกับประเภทของสายส่งไฟฟ้าเองด้วย รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าความยาวปานกลางซึ่งใช้วงจรสมมูล π



รูปที่ 5.7 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าที่แทนด้วยวงจรสมมูล π

การเปลี่ยนแปลงค่า Susceptance ของสายส่งไฟฟ้า ก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC แสดงในสมการที่ (5.14) โดยที่ System admittance matrix Y'_{bus} จำเป็นต้องมีการปรับค่าดังแสดงในสมการที่ (5.15)

$$\Delta y_{ij} = y'_{ij} - y_{ij} = (g'_{ij} + jb'_{ij}) - (g_{ij} + jb_{ij}) \quad (5.14)$$

โดยที่

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}}, b_{ij} = -\frac{x_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}}, g'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_c)^2}}, b'_{ij} = -\frac{x_{ij} + x_c}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_c)^2}}$$

$$Y'_{bus} = Y_{bus} + \begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y_{ij} & 0 & \dots & 0 & -\Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta y_{ij} & 0 & \dots & 0 & \Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} \text{row-}i \\ \\ \\ \\ \text{row-}j \\ \\ \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{col-}i \\ \\ \\ \\ \text{col-}j \\ \\ \end{matrix} \end{matrix} \quad (5.15)$$

5.4 ความต่างของราคาตลาดบนสายส่งไฟฟ้า

ความต่างของราคาตลาดบนสายส่งไฟฟ้าระหว่างบัส i และ บัส j ได้ให้ความหมายโดยนัยแทนต้นทุนสำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าจากบัส i ไปยัง บัส j [51] คล้ายกันกับการขนส่งก๊าซธรรมชาติ การขนส่งด้วยรถบรรทุก และการส่งสินค้าประเภทอื่น โดยมีสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\Delta \rho_k = \sum_{k=1}^{nl} \sum_{l=1}^{nb} N_{kl} \rho_l \quad (5.16)$$

โดยที่ ρ คือ เวกเตอร์ของราคาตลาดของไฟฟ้า

$\Delta \rho$ คือ เวกเตอร์ของความต่างของราคาตลาด ของไฟฟ้า

N คือ Network Incidence Matrix ของระบบไฟฟ้า [16]

nb, nl คือ จำนวนบัสและจำนวนสายส่งค่า

ความต่างของราคาตลาดในสมการ (5.16) ได้นำมาใช้ในการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ TCSC อันเป็นแนวทางหนึ่งในการปรับลดต้นทุนในการส่งกำลังไฟฟ้า โดยแบบจำลองการติดตั้งได้อธิบายในหัวข้อ 5.3 ทั้งนี้จำเป็นต้องพิจารณา Sensitivity of line flow to the series compensation [45] ร่วมด้วย โดยค่านี้แทนด้วยสมการคณิตศาสตร์เท่ากับ

$$S_{W_{k,l}} = \frac{\partial W_k}{\partial x_l} \cdot \frac{x_l}{W_k} \quad (5.17)$$

โดยที่ $S_{W_{k,l}}$ คือ ค่า Sensitivity of line flow บนสายส่งเส้นทาง k เนื่องการชดเชยสายส่งเส้นทาง l
 W_k คือ กำลังไฟฟ้าที่เคลื่อนบนสายส่งเส้นทาง k จากบัส i ไปยังบัส j
 x_l คือ ค่า Reactance ของสายส่งไฟฟ้าเส้นทาง l

ค่า $S_{W_{k,l}}$ ที่มีค่าบวก มีความหมายคือ การชดเชยสายส่งไฟฟ้าในเส้นทาง l ทำให้ Power Flow ในเส้นทาง k มีค่าลดลง และในทางตรงกันข้าม $S_{W_{k,l}}$ ที่มีค่าลบ มีความหมายเท่ากับ การชดเชยสายส่งไฟฟ้าในเส้นทาง l ทำให้ Power Flow ในเส้นทาง k มีค่าเพิ่มมากขึ้นในเส้นทางที่ชดเชย และเนื่องด้วยความคับคั่งบนสายส่งไฟฟ้าเป็นสาเหตุสำคัญของความแตกต่างของราคาตลาดของไฟฟ้า การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC เพื่อการปรับลดความแตกต่างของราคาตลาดบนสายส่งเส้นทาง k จึงพิจารณาสายส่งไฟฟ้าเส้นทาง l ที่ให้ค่า $S_{W_{k,l}}$ สูงสุดในด้านลบก่อน เพื่อเป็นการปรับลดองค์ประกอบความคับคั่งของราคาตลาดของไฟฟ้า โดยรายละเอียดขององค์ประกอบราคาตลาดของไฟฟ้าได้อธิบายในบทที่ 3

5.5 สรุป

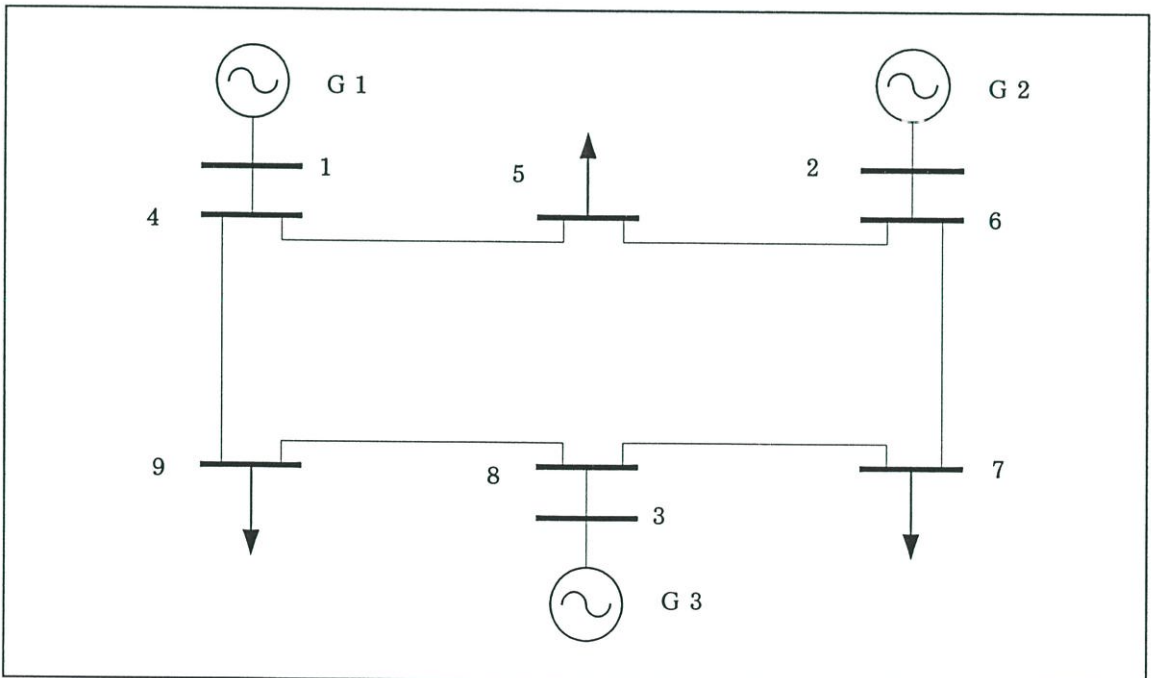
ปัจจุบัน มีการกล่าวถึงเทคโนโลยีของระบบ Flexible AC Transmission System (FACTS) กันอย่างกว้างขวาง และบทความวิชาการที่เกี่ยวข้องได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่จำนวนมาก ทำให้นักวิจัยและพัฒนาระบบ FACTS จึงมีออกมามากอย่างต่อเนื่อง โดยพิจารณาจากหลักการทำงาน เราสามารถจำแนกประเภทของอุปกรณ์ FACTS ออกเป็น 4 ประเภทด้วยกัน ประกอบด้วย Static shunt compensator, Static series compensator, Static voltage and phase angle regulator และ Combined compensator และในบทความวิชาการได้กล่าวถึงความน่าสนใจอุปกรณ์ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) อย่างมาก ซึ่งกำลังเข้ามามีบทบาทสำคัญในระบบกำลังไฟฟ้าดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1 อุปกรณ์ TCSC เป็นสมาชิกหนึ่งของ FACTS Devices ในประเภท Static series compensator และมีส่วนประกอบสำคัญ คือ Metal oxide varistor (MOV), Thyristor-controlled reactor (TCR) และ ตัวเก็บประจุ ต่อขนานกัน รายละเอียดของอุปกรณ์ TCSC ได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.1 หลักการทำงานและการวิเคราะห์ห้วงจรอธิบายในหัวข้อ 5.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าได้อธิบายในหัวข้อ 5.3 ซึ่งมีกรกล่าวถึงความสามารถในการรับภาระของสายส่งไฟฟ้าและแบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าในหัวข้อ 5.3.1 และ 5.3.2 ตามลำดับ การคำนวณความต่างของราคาตลาดบนสายส่งไฟฟ้าและความหมายโดยนัยได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.4 ซึ่งในตอนท้ายกล่าวถึงการหาค่า Sensitivity of line flow: S_{w_i} เพื่อใช้ในการพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์ด้วย

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

6.1 บทนำ

การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมการคำนวณเทียบกับ Simulation Package [53] โดยใช้ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9, 14 และ 30 BUS เป็นระบบทดสอบ ได้แสดงในหัวข้อที่ 6.2 จากนั้นระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9, 14, 30, 57 และ 118 BUS ได้เลือกเป็นกรณีศึกษาสำหรับการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้าดังแสดงในหัวข้อที่ 6.3 รายละเอียดระบบทดสอบแสดงในเอกสารอ้างอิง [54] และ ภาคผนวก ก ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าอ้างอิงจากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และเพื่อเป็นการยืนยันความสามารถของเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point การคำนวณเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นจึงมีขึ้น โดยเปรียบเทียบกับเทคนิค Simplex-based Linear Programming และ Sequential Quadratic Programming ดังแสดงในหัวข้อที่ 6.4 ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9, 14 และ 30 BUS ได้เลือกมาใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ผลการทดสอบแสดงในหัวข้อที่ 6.5



รูปที่ 6.1 ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9 BUS สำหรับการทดสอบความถูกต้อง

6.2 การทดสอบโปรแกรม

เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมการคำนวณ ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9 BUS และ 30 BUS ได้นำมาใช้สำหรับงานนี้ โดยระบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 6.1 – 6.3 และผลการทดสอบโปรแกรมเปรียบเทียบกับ Simulation Package [53] แสดงในตารางที่ 6.1 – 6.6 ตามลำดับ (การผลิตกำลังไฟฟ้าและราคาตลาดของไฟฟ้า) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9 BUS

ตารางที่ 6.1 การผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 9 BUS

Gen. No.	เทคนิค PCPDIPLP		Simulation Package	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
G1	73.52	16.21	73.52	16.21
G2	34.09	3.72	34.09	3.72
G3	212.91	-6.84	212.91	-6.84

ตารางที่ 6.2 ราคาตลาดของไฟฟ้า สำหรับระบบทดสอบ IEEE 9 BUS

BUS No.	ราคาตลาดของไฟฟ้า (THB/MWhr)	
	เทคนิค PCPDIPLP	Simulation Package
1	550.561	550.570
2	538.061	538.055
3	521.097	520.212
4	550.561	550.568
5	551.840	551.842
6	521.097	521.081
7	535.513	535.547
8	538.062	539.041
9	556.434	556.446

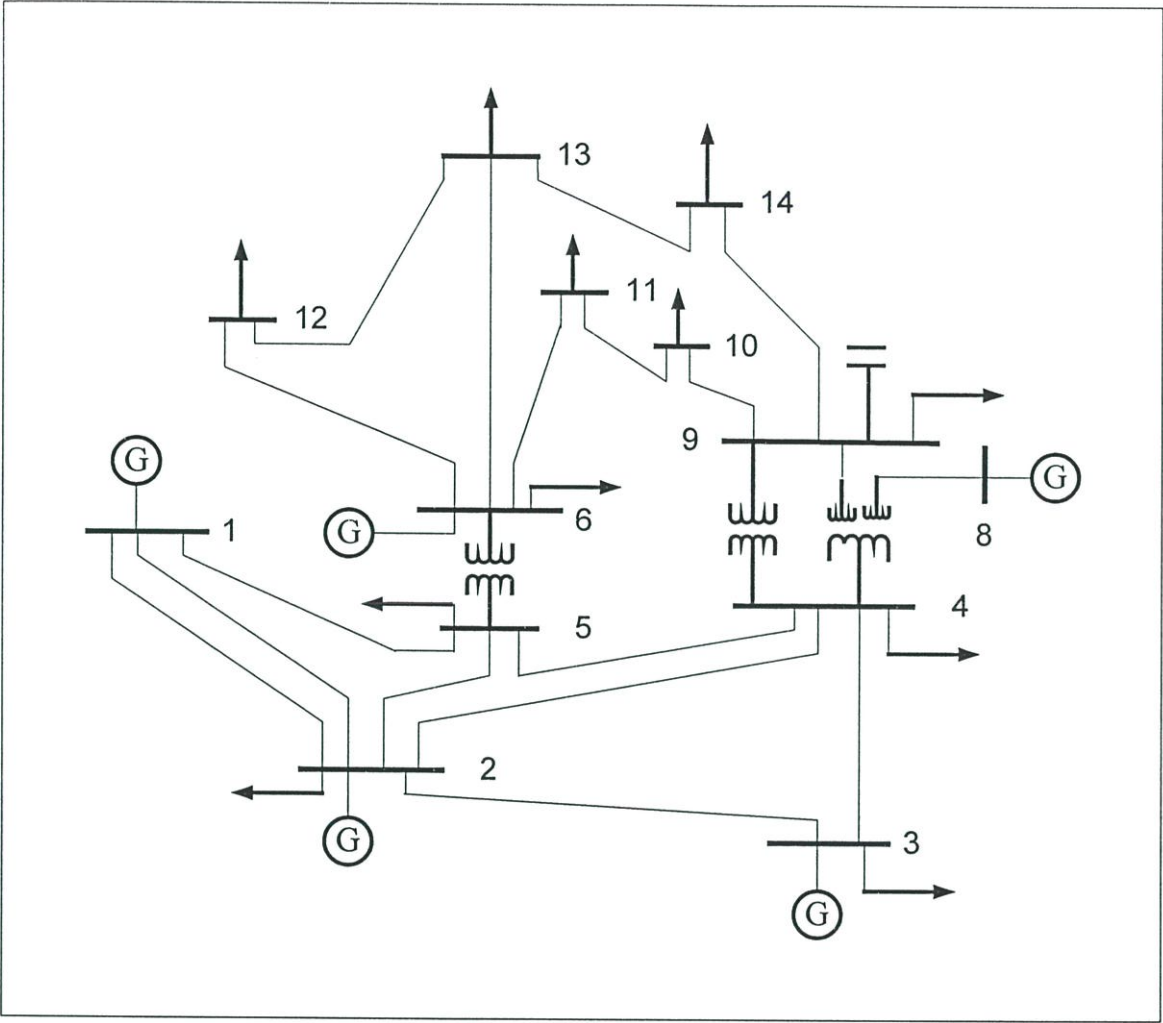
ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 14 BUS

ตารางที่ 6.3 การผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 14 BUS

Gen. No.	เทคนิค PCPDIPLP		Simulation Package	
	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
G1	10.00	-1.81	10.00	-1.81
G2	18.91	14.33	18.91	14.33
G3	179.55	18.24	179.55	18.24
G4	10.00	17.14	10.00	17.14
G5	44.04	22.79	44.04	22.79

ตารางที่ 6.4 ราคาตลาดของไฟฟ้า สำหรับระบบทดสอบ IEEE 14 BUS

BUS No.	ราคาตลาดของไฟฟ้า (THB/MWhr)	
	เทคนิค PCPDIPLP	Simulation Package
1	465.161	465.615
2	464.226	464.144
3	444.683	443.420
4	473.419	473.813
5	473.753	474.124
6	475.410	475.821
7	472.611	472.282
8	472.471	472.442
9	472.423	472.420
10	476.078	475.964
11	477.422	477.318
12	484.682	484.611
13	486.535	486.186
14	491.188	490.998



รูปที่ 6.2 ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 14 BUS สำหรับการทดสอบความถูกต้อง [54]

ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS

ตารางที่ 6.5 การผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 BUS

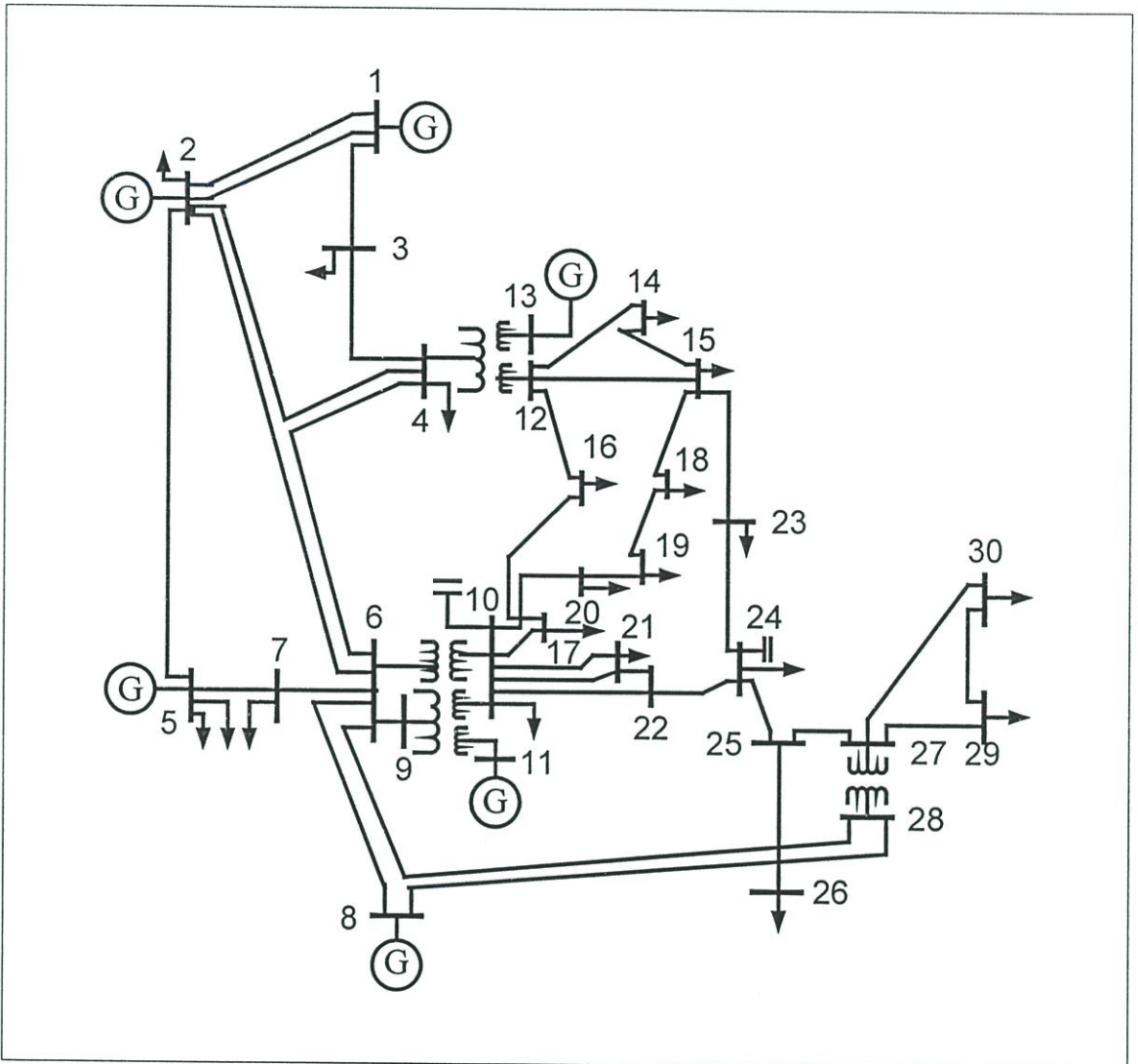
Gen. No.	เทคนิค PCPDIPLP		Simulation Package	
	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
G1	17.47	-10.63	17.47	-10.63
G2	80.00	-11.79	80.00	-11.79
G3	40.00	44.70	40.00	44.70
G4	0.00	48.84	0.00	48.84
G5	14.98	11.35	14.98	11.35
G6	40.27	28.57	40.27	28.57

ตารางที่ 6.6 ราคาตลาดของไฟฟ้า สำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 BUS

BUS No.	ราคาตลาดของไฟฟ้า (THB/MWhr)	
	เทคนิค PCPDIPLP	Simulation Package
1	461.954	462.012
2	461.411	461.645
3	472.234	472.324
4	474.024	474.144
5	468.234	468.518
6	472.639	472.640
7	475.343	475.402
8	1,039.887	1,040.201
9	502.886	503.281
10	518.277	518.372
11	502.886	503.017
12	495.634	495.746
13	494.876	494.943

ตารางที่ 6.6 ราคาตลาดของไฟฟ้า สำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 BUS (ต่อ)

BUS No.	ราคาตลาดของไฟฟ้า (THB/MWhr)	
	เทคนิค PCPDIPLP	Simulation Package
14	508.486	507.882
15	514.468	514.504
16	508.557	508.564
17	517.690	517.335
18	523.849	524.051
19	526.982	527.142
20	525.337	525.543
21	532.271	532.417
22	530.683	530.703
23	530.202	530.503
24	566.515	566.624
25	661.057	660.950
26	672.093	672.301
27	464.377	464.421
28	584.387	584.215
29	475.934	476.163
30	483.893	484.054

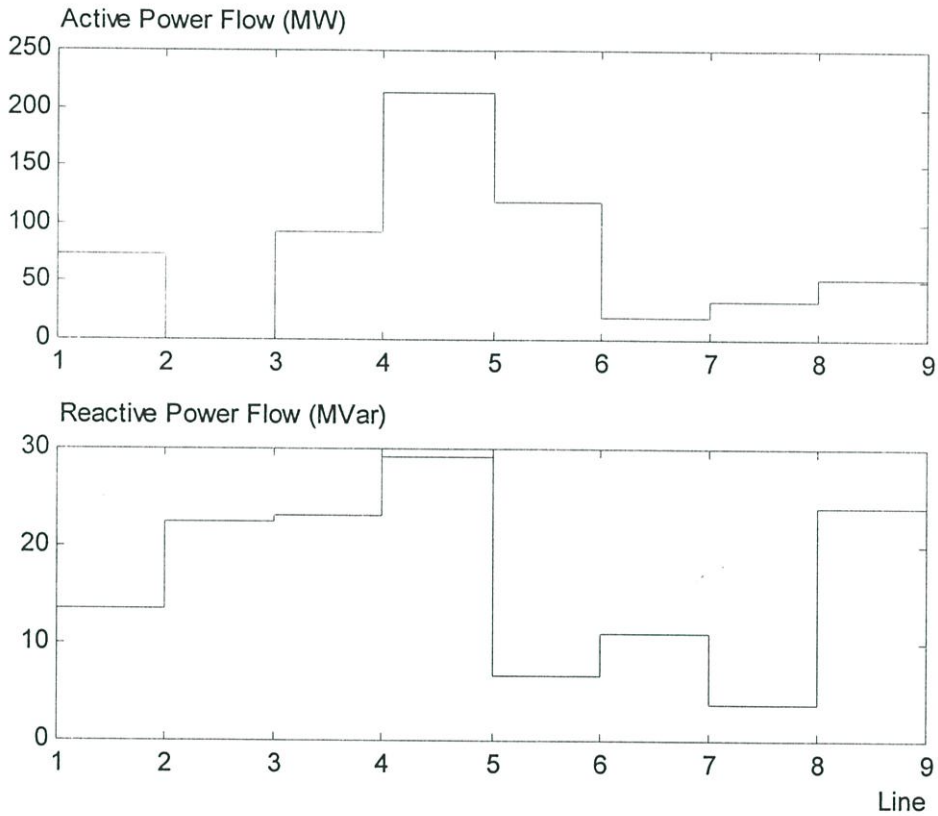


รูปที่ 6.3 ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS สำหรับการทดสอบความถูกต้อง [54]

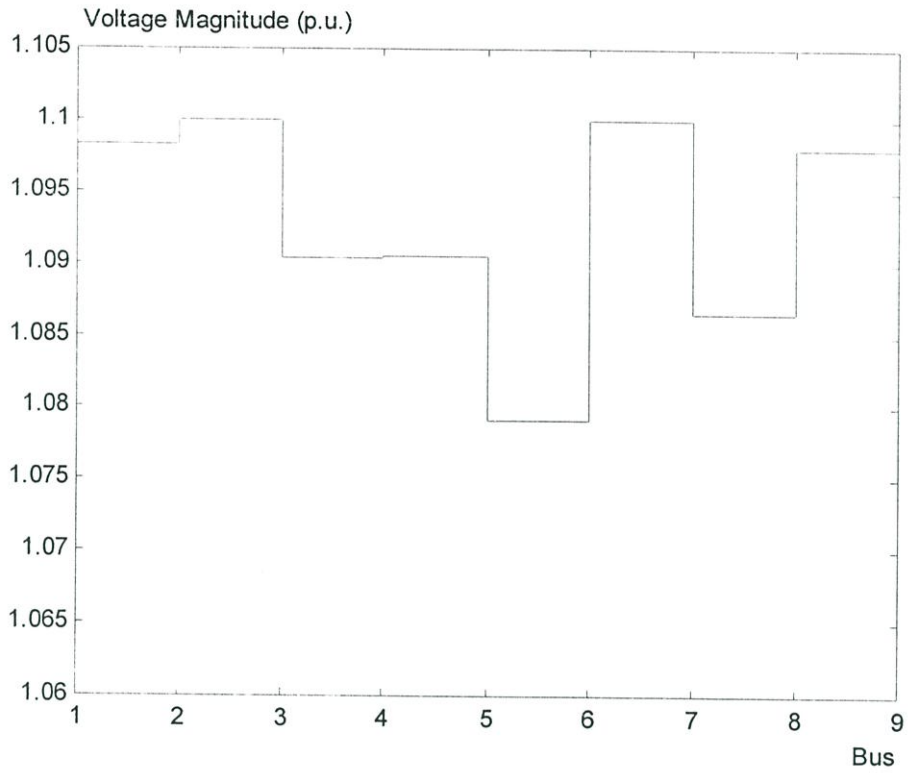
6.3 กรณีศึกษา การคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า

6.3.1 ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 BUS

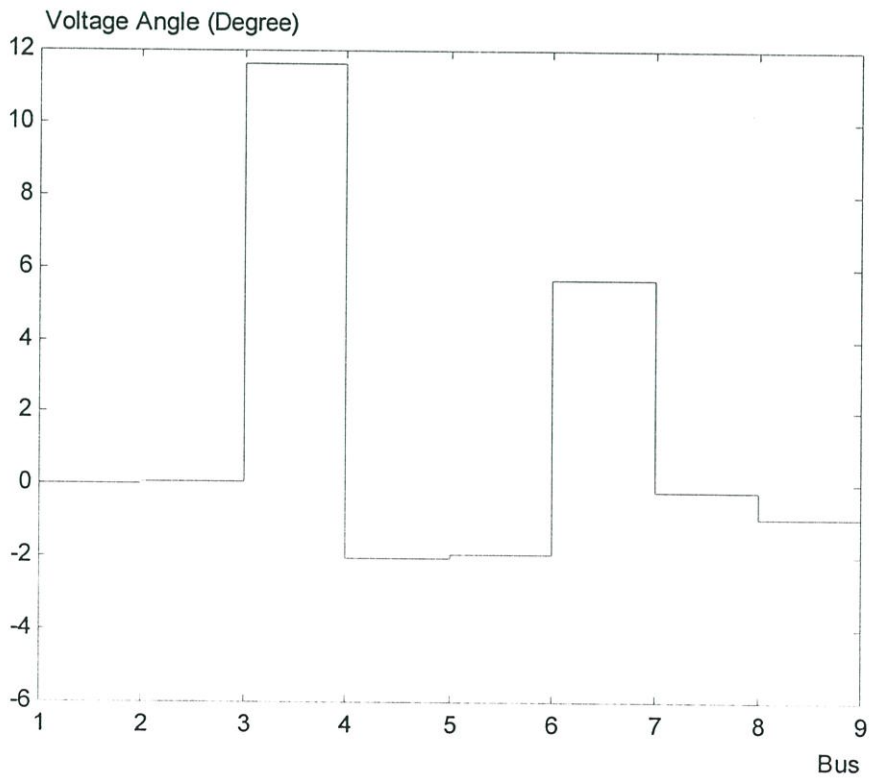
ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า รายละเอียดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 BUS แสดงในเอกสารอ้างอิง [54] ค่า Power Flow ขนาดแรงดันไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้า ราคาและความต่างของราคาตลาดของไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 6.4 – 6.8 ตามลำดับ



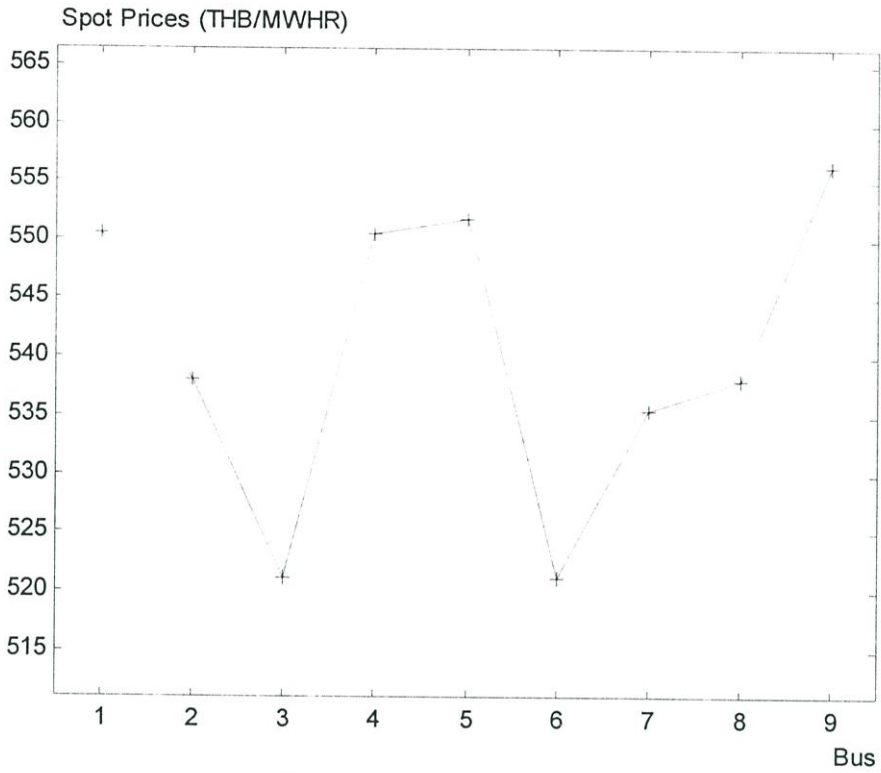
รูปที่ 6.4 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 BUS



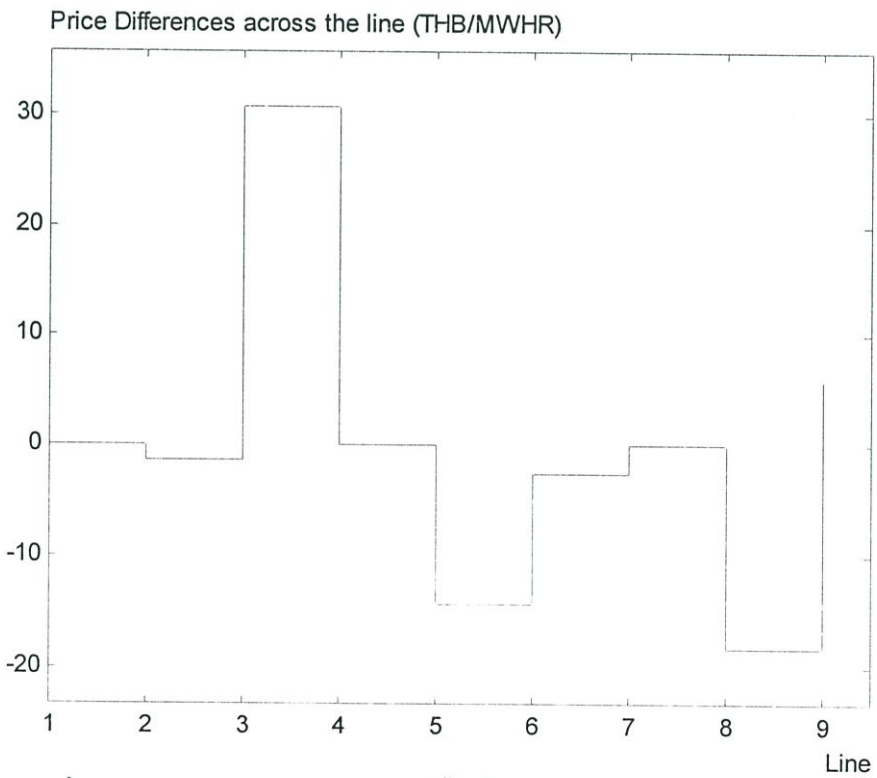
รูปที่ 6.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 BUS



รูปที่ 6.6 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 BUS



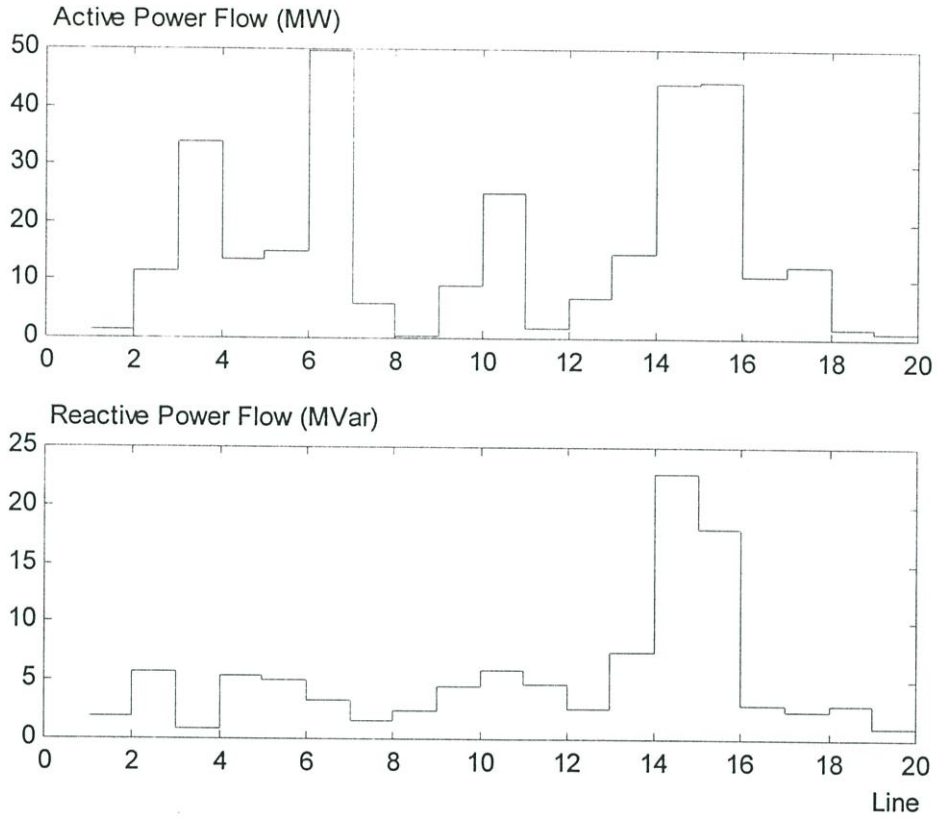
รูปที่ 6.7 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 BUS



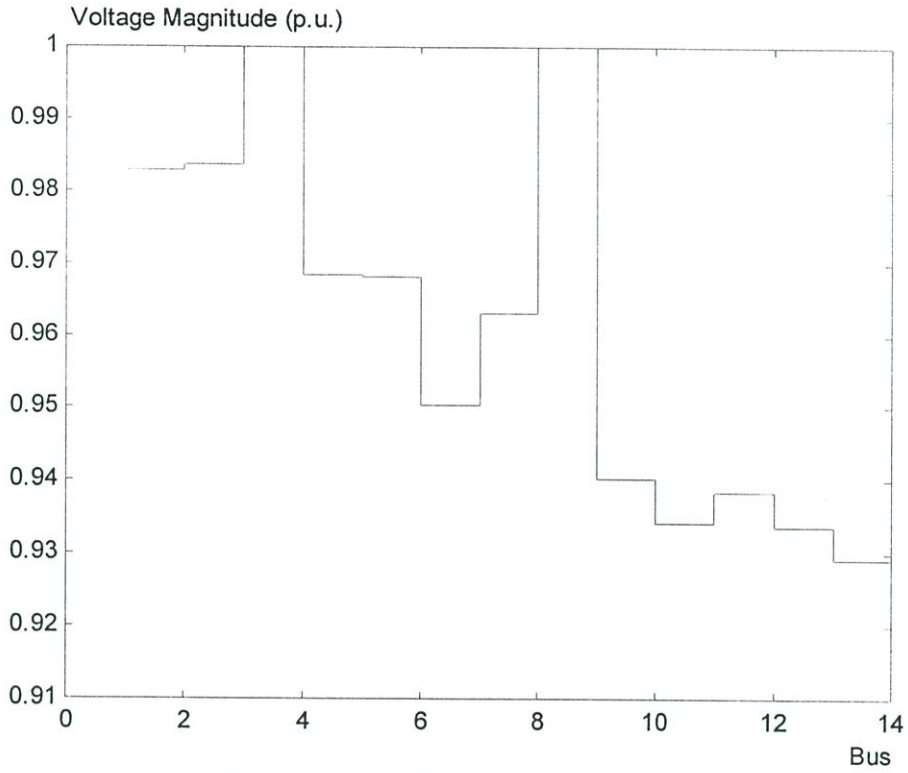
รูปที่ 6.8 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 BUS

6.3.2 ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 BUS

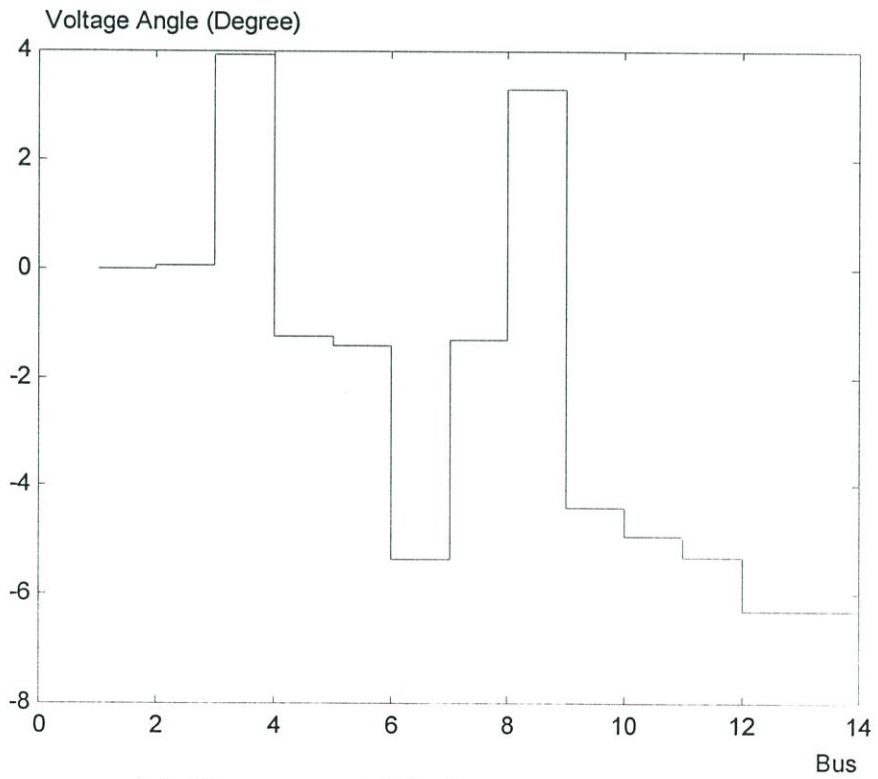
ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า รายละเอียดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 BUS แสดงในเอกสารอ้างอิง [54] ค่า Power Flow ขนาดแรงดันไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้า ราคาและความต่างของราคาตลาดของไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 6.9 – 6.13



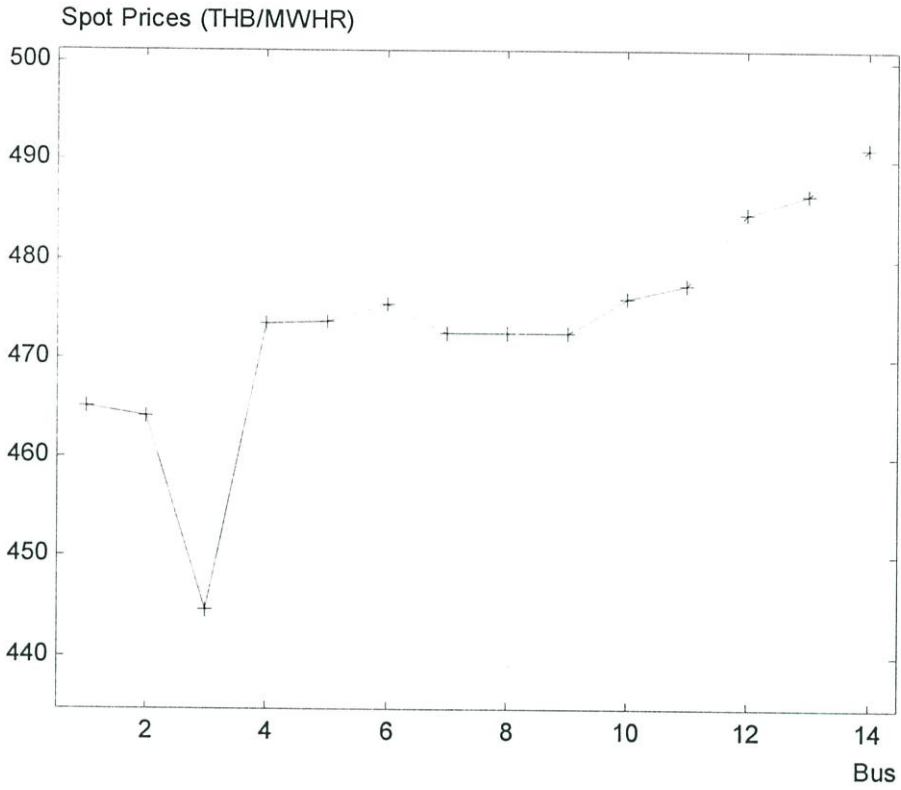
รูปที่ 6.9 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 BUS



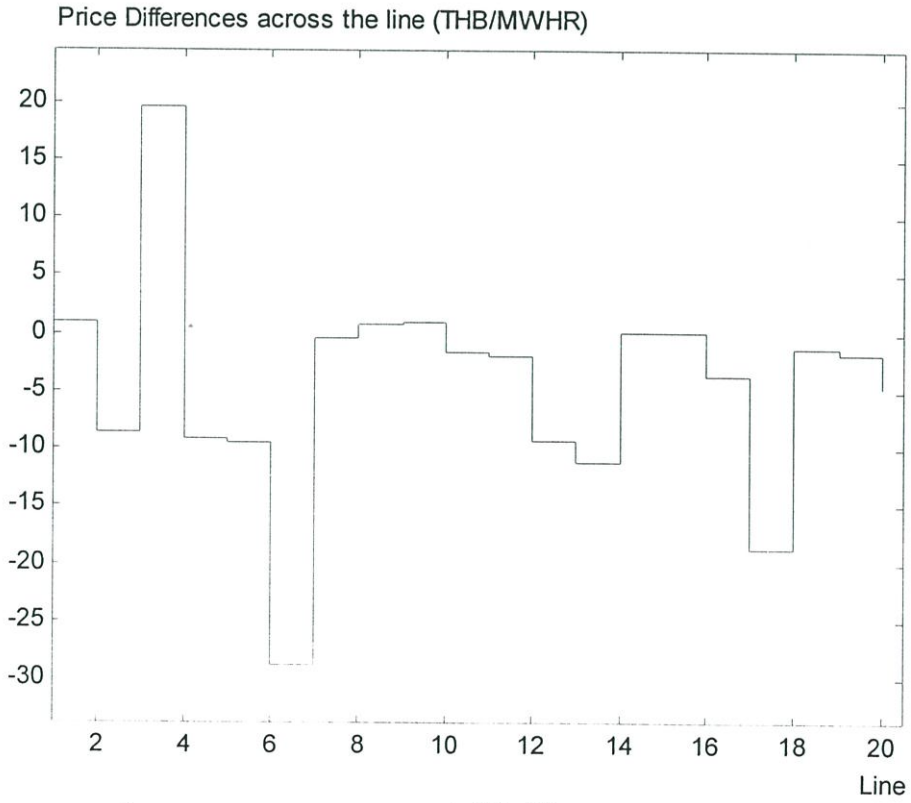
รูปที่ 6.10 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 BUS



รูปที่ 6.11 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 BUS



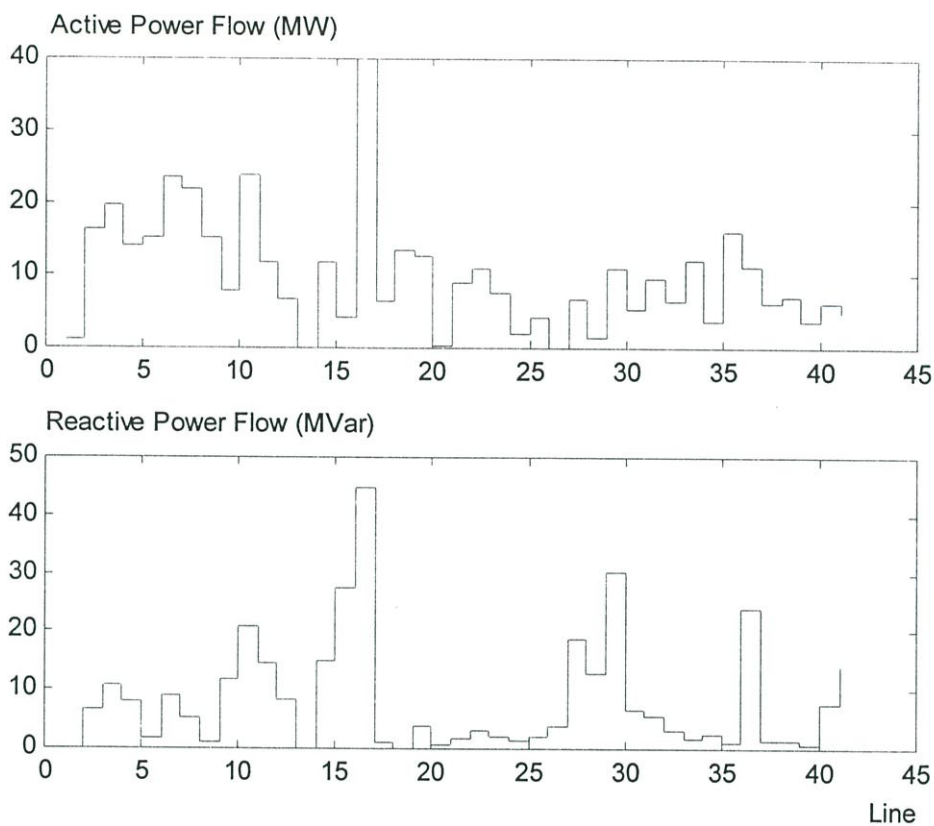
รูปที่ 6.12 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 BUS



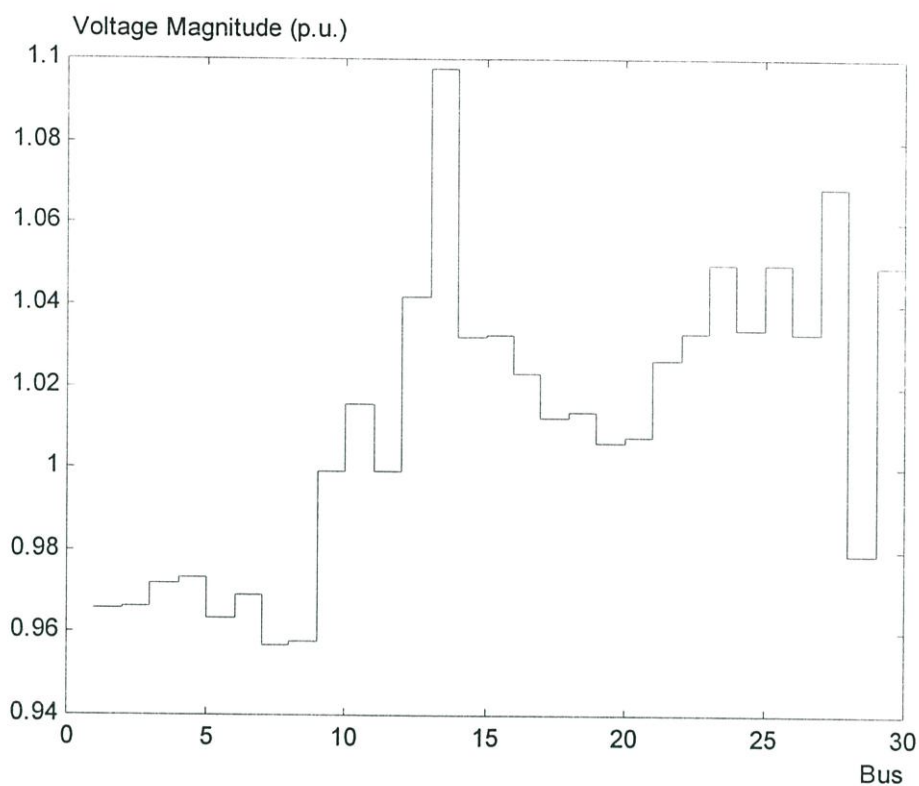
รูปที่ 6.13 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 BUS

6.3.3 ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 BUS

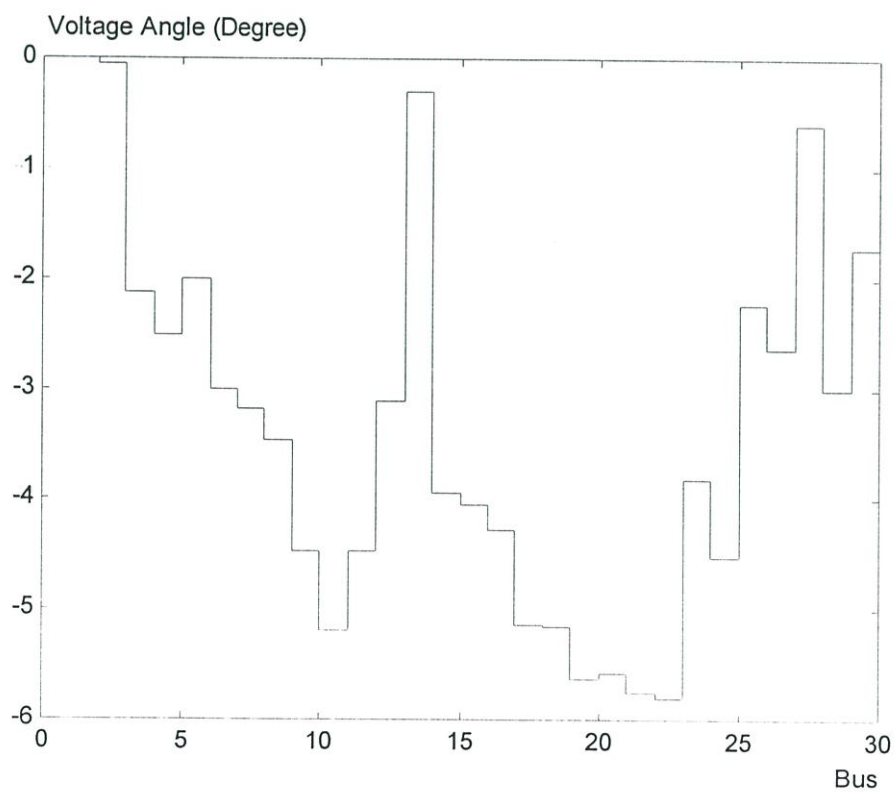
ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า รายละเอียดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 BUS แสดงในเอกสารอ้างอิง [54] ค่า Power Flow ขนาดแรงดันไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้า ราคาและความต่างของราคาตลาดของไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 6.14 – 6.18



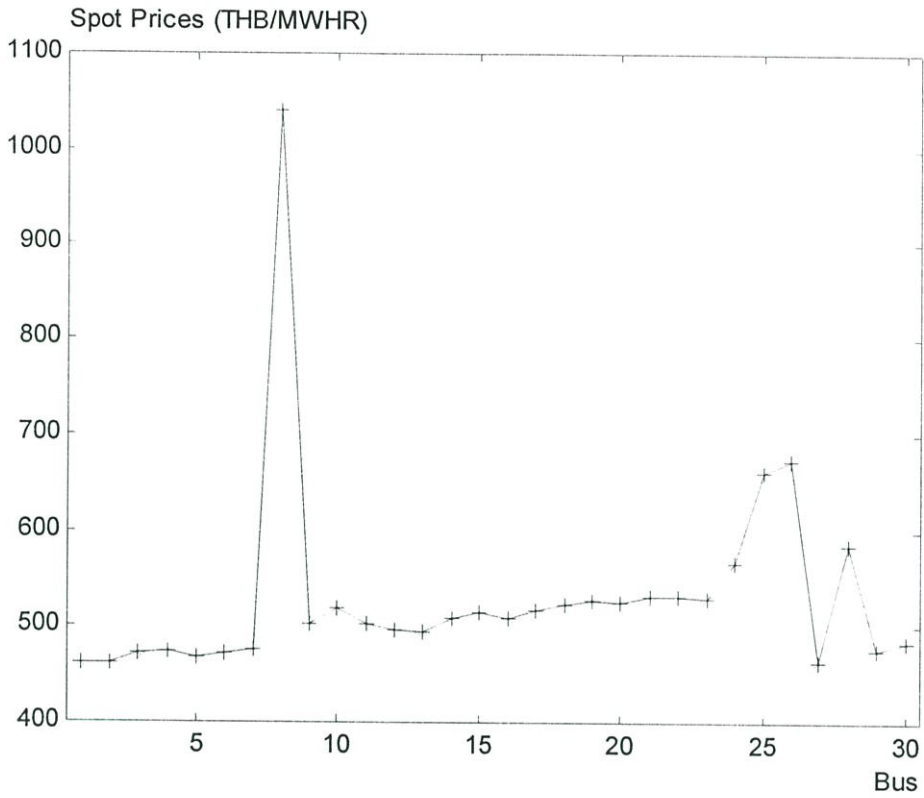
รูปที่ 6.14 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 BUS



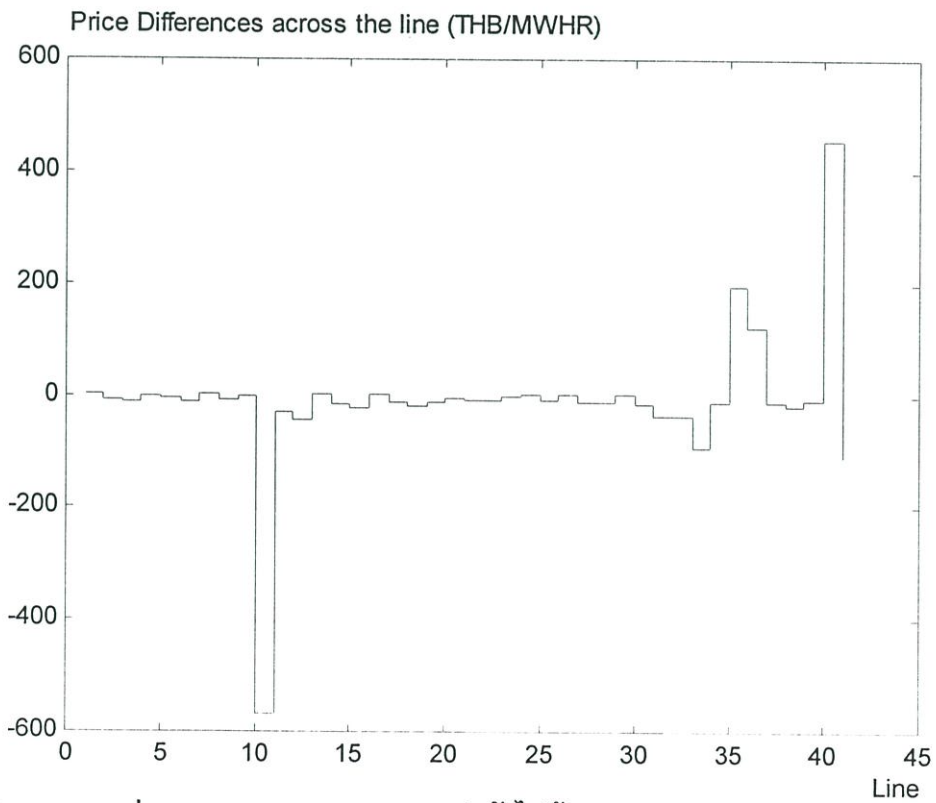
รูปที่ 6.15 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 BUS



รูปที่ 6.16 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 BUS



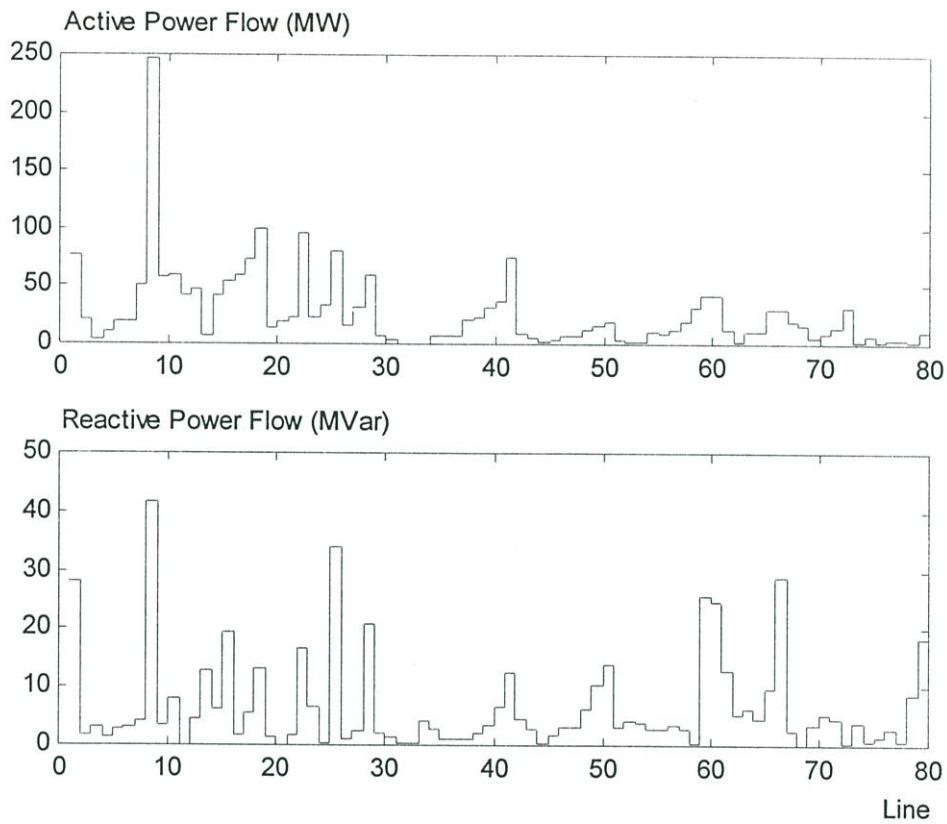
รูปที่ 6.17 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 BUS



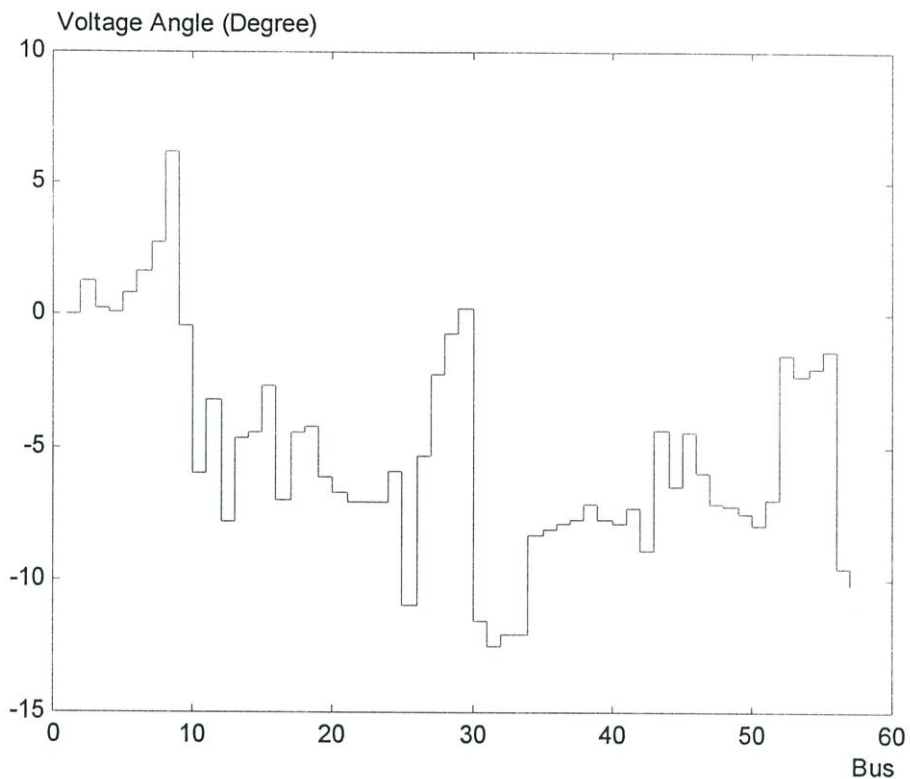
รูปที่ 6.18 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 BUS

6.3.4 ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 BUS

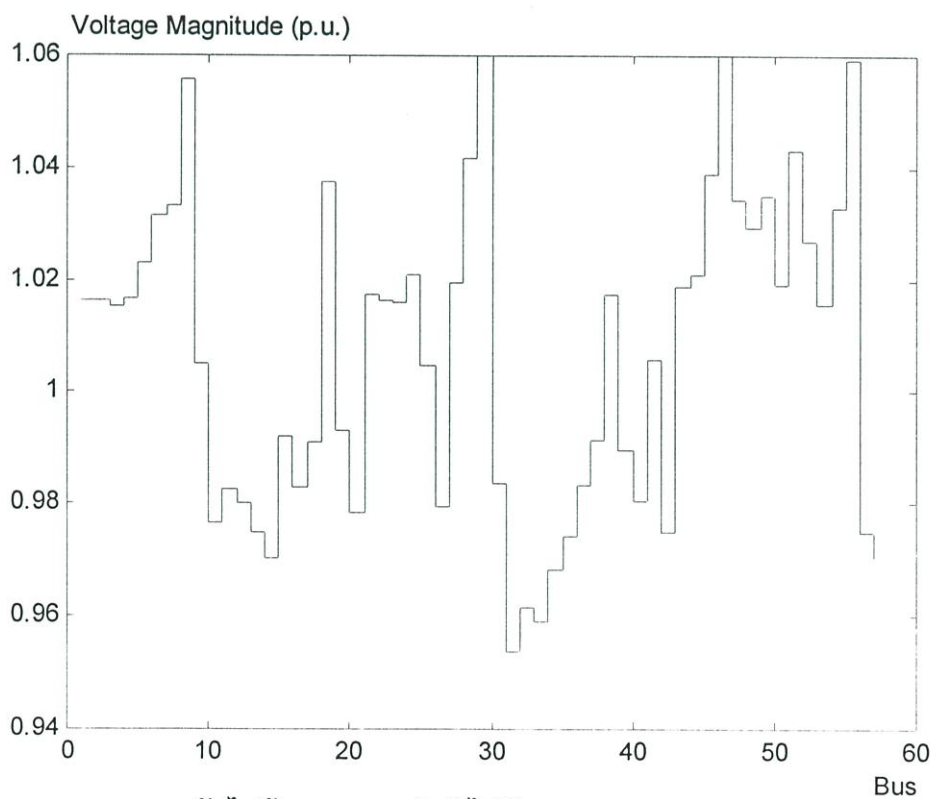
ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า รายละเอียดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 BUS แสดงในเอกสารอ้างอิง [54] ค่า Power Flow ขนาดแรงดันไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้า ราคาและความต่างของราคาตลาดของไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 6.19 – 6.23



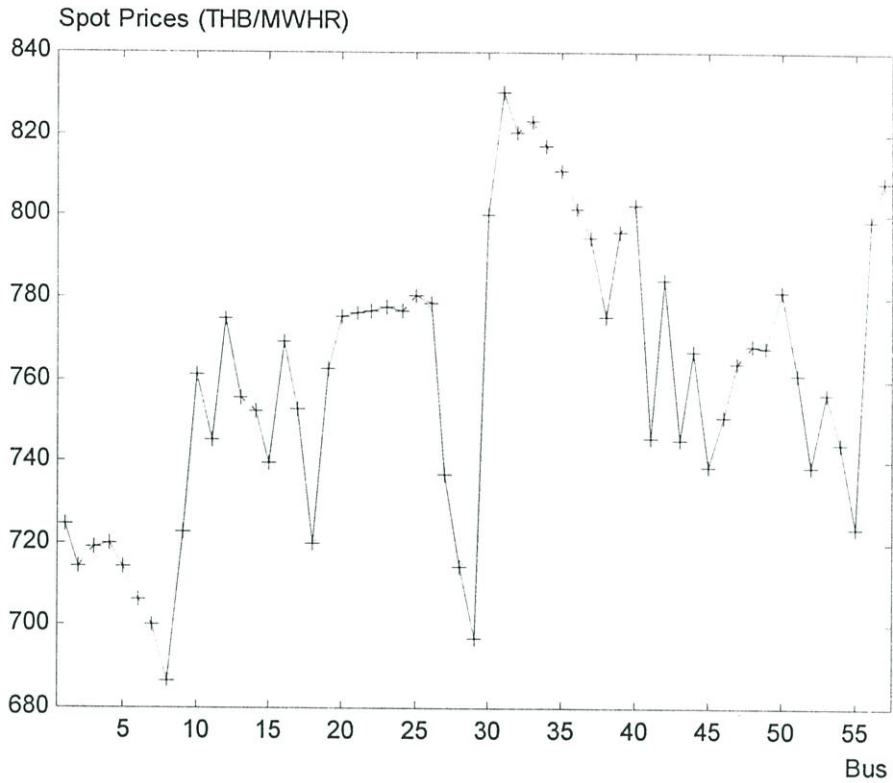
รูปที่ 6.19 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 BUS



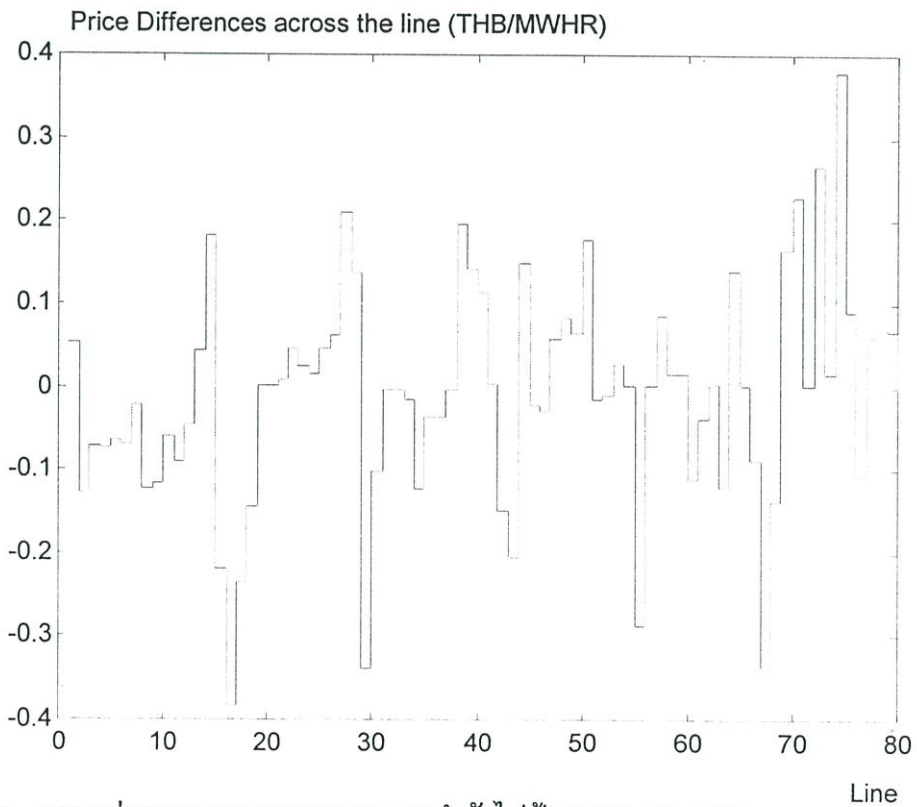
รูปที่ 6.20 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 BUS



รูปที่ 6.21 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 BUS



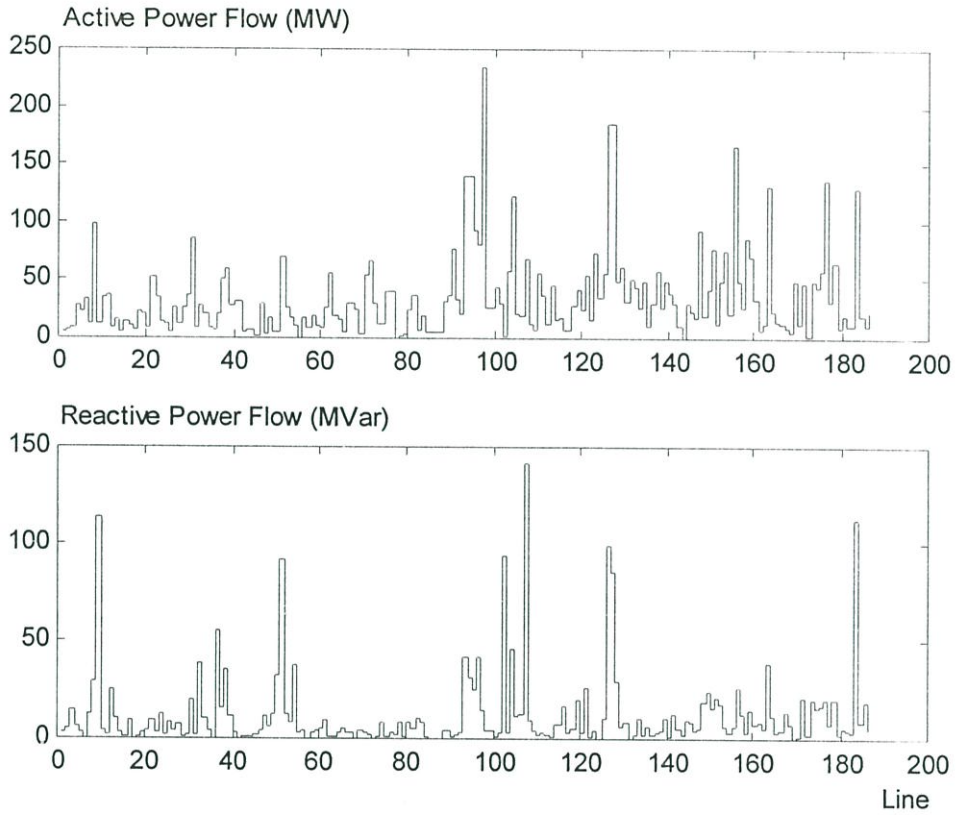
รูปที่ 6.22 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 BUS



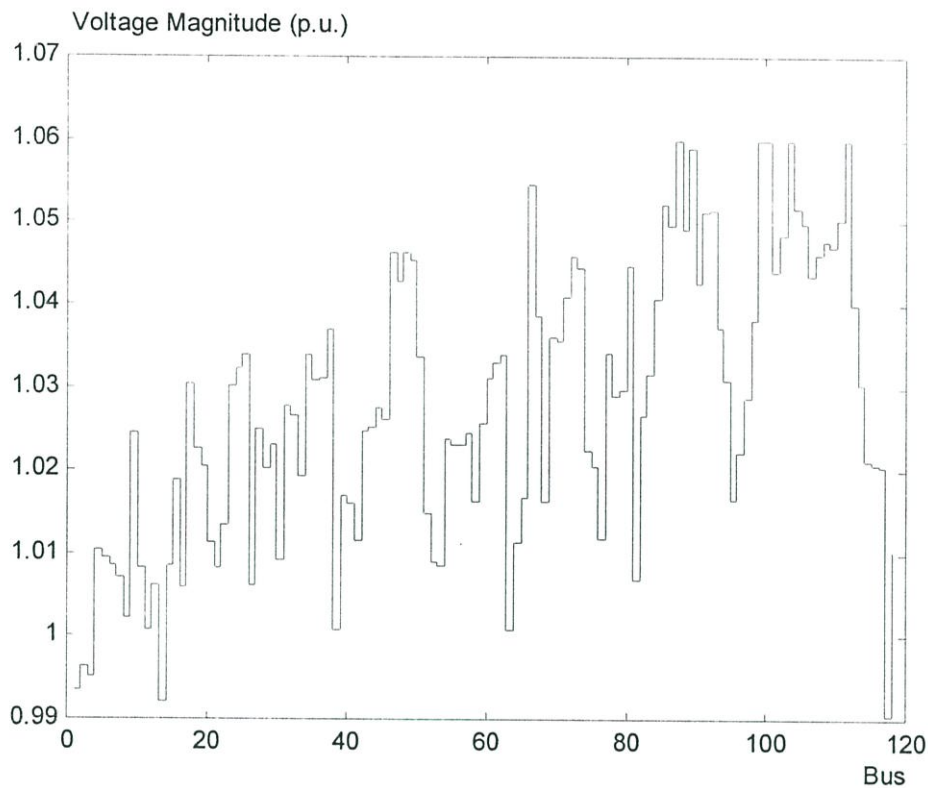
รูปที่ 6.23 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 57 BUS

6.3.5 ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 BUS

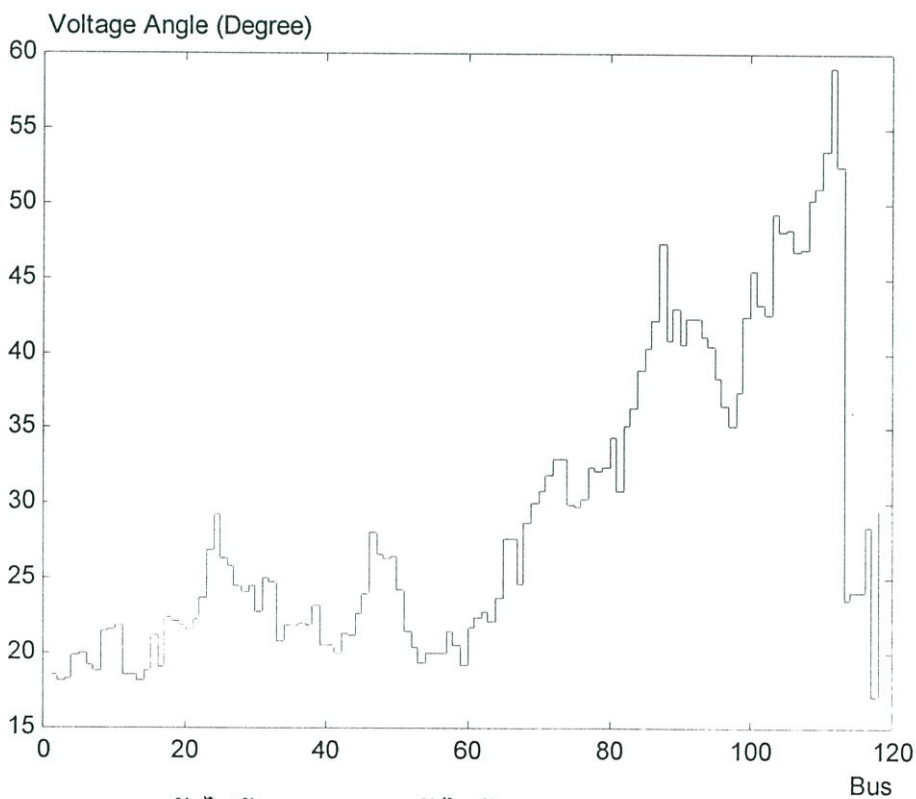
ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า รายละเอียดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 BUS แสดงในเอกสารอ้างอิง [54] ค่า Power Flow ขนาดแรงดันไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้า ราคาและความต่างของราคาตลาดของไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 6.24 – 6.28



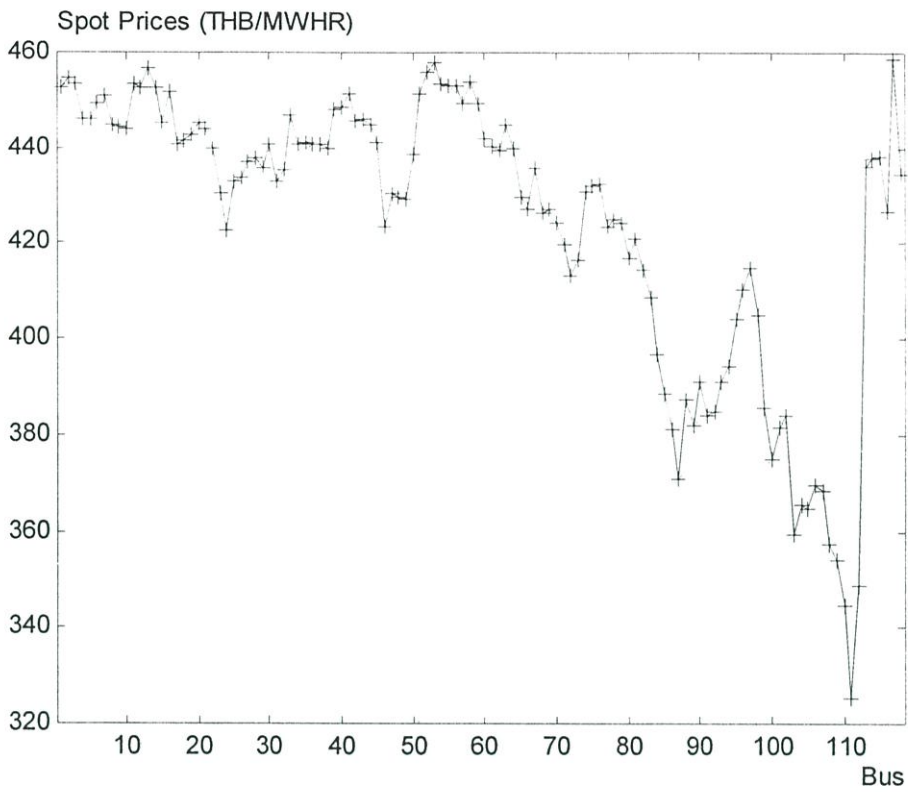
รูปที่ 6.24 ค่า Power Flow ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 BUS



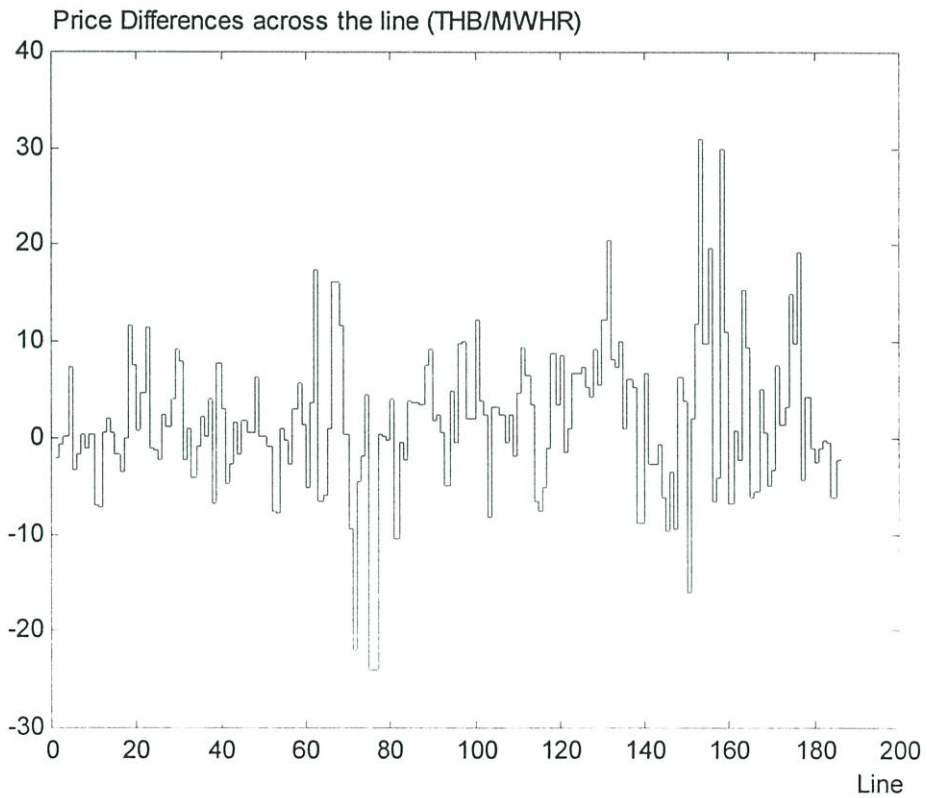
รูปที่ 6.25 ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 BUS



รูปที่ 6.26 มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 BUS

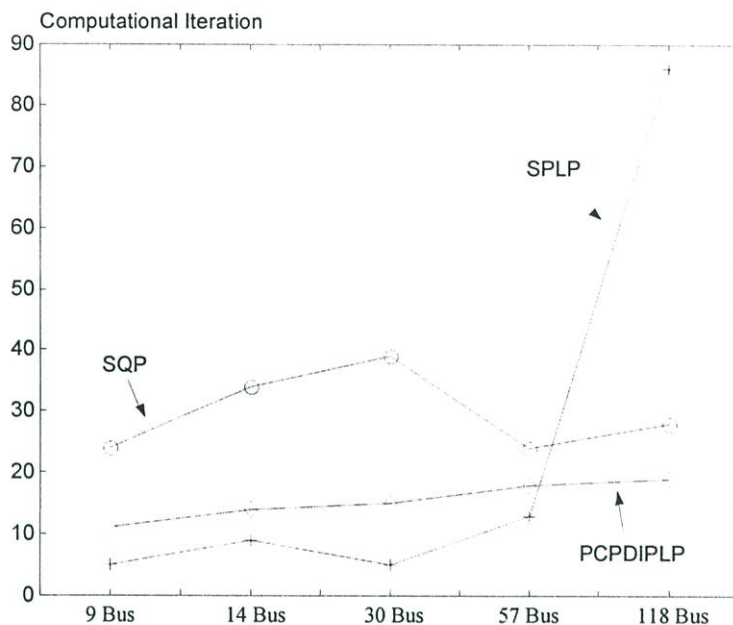


รูปที่ 6.27 ราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 BUS



รูปที่ 6.28 ความต่างของราคาตลาดของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 118 BUS

6.4 ความสามารถของเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point



รูปที่ 6.29 จำนวนรอบการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า

ตารางที่ 6.7 ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้สำหรับการคำนวณ

ระบบทดสอบ	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)		
	SQP	SPLP	PCPDIPLP
9 BUS	1.38	2.12	4.15
14 BUS	4.19	6.50	16.89
30 BUS	12.37	21.47	33.62
57 BUS	27.63	40.20	27.23
118 BUS	1,760.71	1,693.56	168.75

*หมายเหตุ

SQP: Successive Quadratic Programming

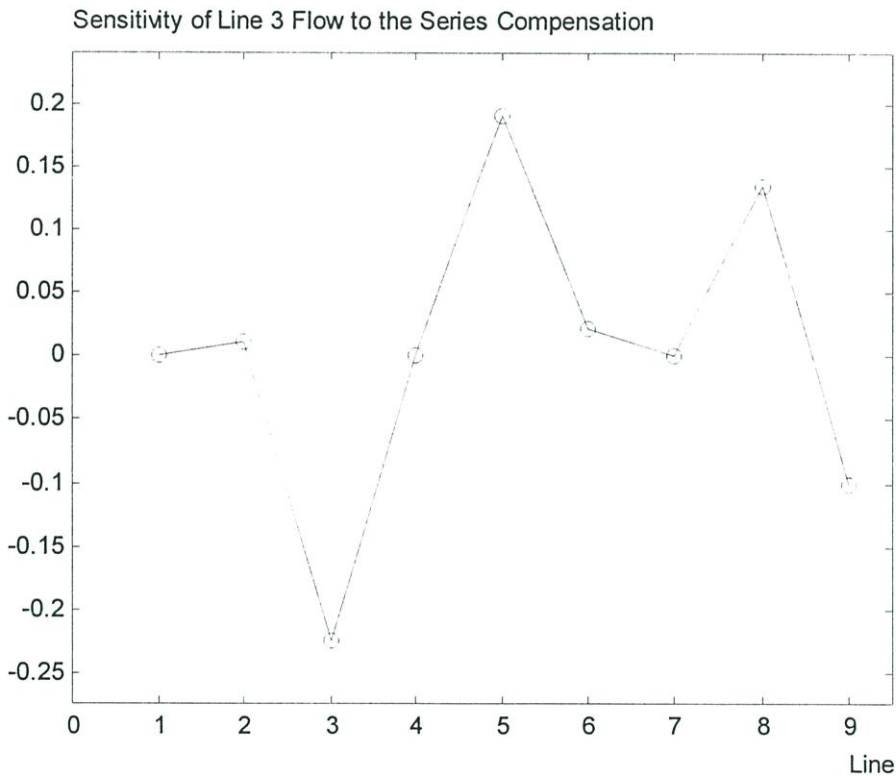
SPLP: Linear Programming with Simplex Technique

PCPDIPLP: Linear Programming with Predictor - Corrector Primal - Dual Interior Point

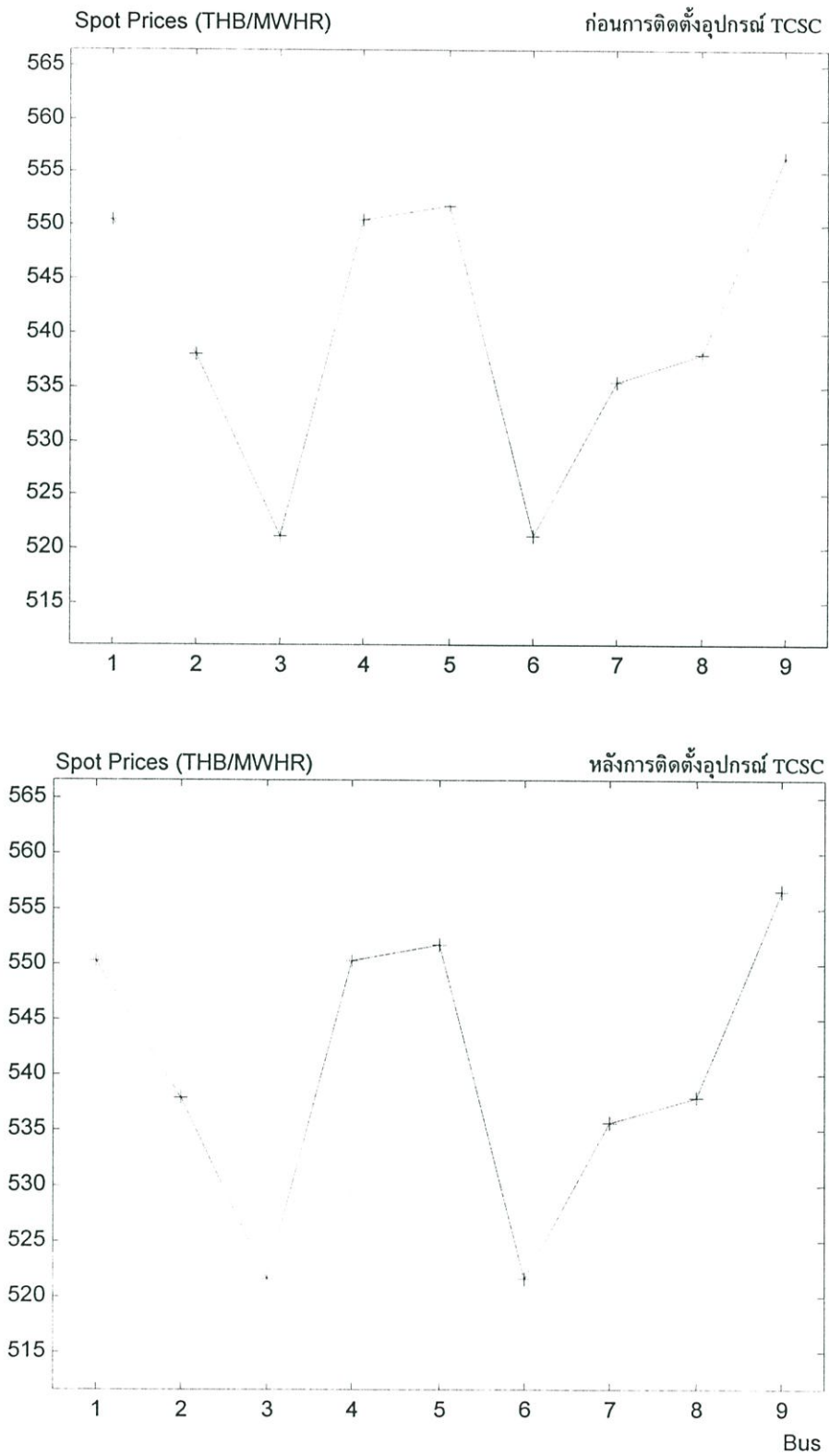
คอมพิวเตอร์มีหน่วยประมวลผล PENTIUM II 450 MHz, RAM 196 MB

6.5 กรณีศึกษา การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 9 BUS

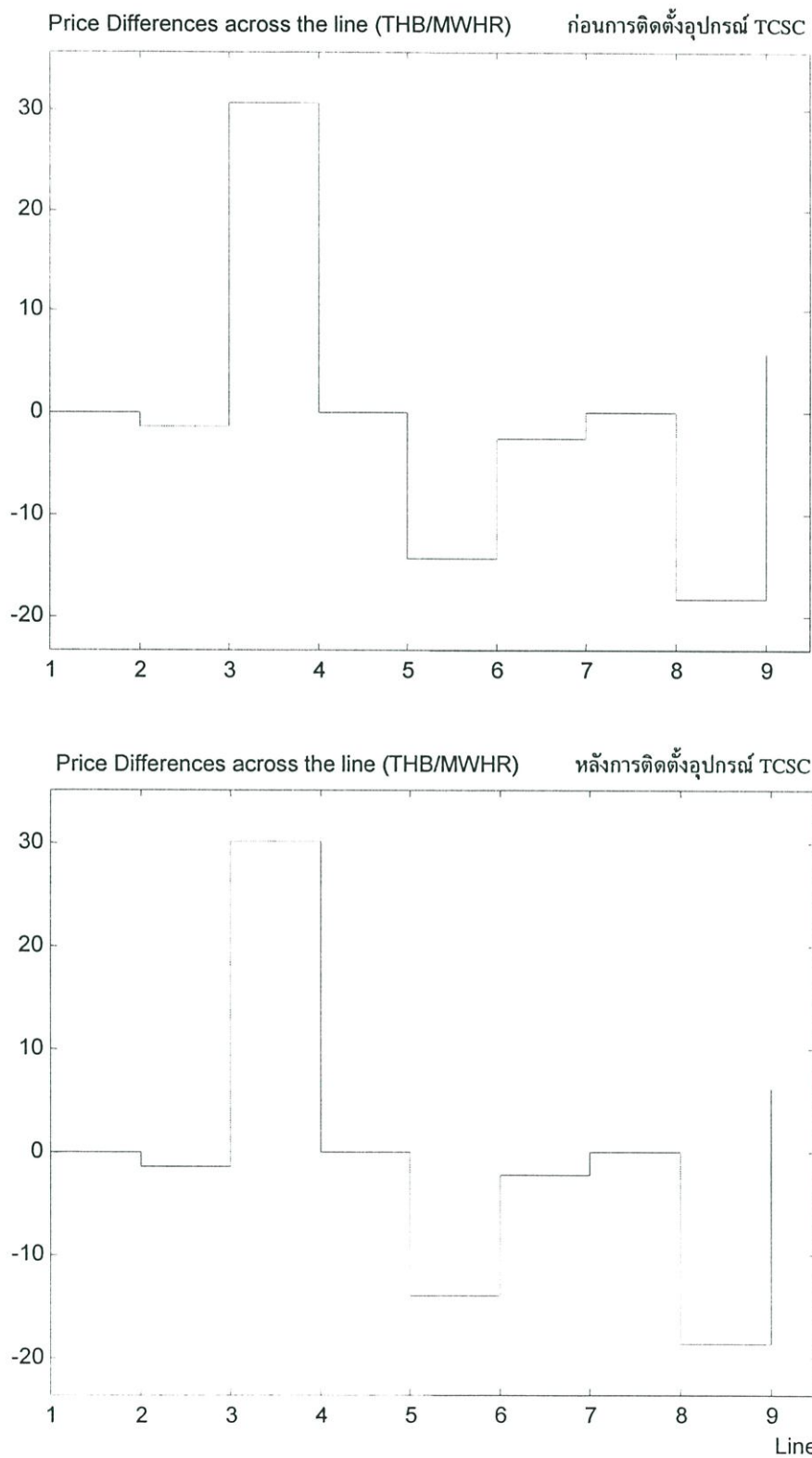
สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9 BUS ผลการคำนวณในหัวข้อที่ 6.2 ราคาตลาดของไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 521 – 556 THB/MWhr โดยค่าความต่างของราคามีค่าสูงสุดที่ประมาณ 30.743 THB/MWhr บนสายส่งเส้นทางที่ 3 ระหว่างบัส 5 และ 6 การปรับลดค่าความต่างของราคาบนสายส่งไฟฟ้าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC มีความจำเป็นต้องพิจารณาค่า Sensitivity of line flow to the series compensation: $S_{W_{k,l}}$ ของสายส่งเส้นทางนี้ร่วมด้วย โดยผลการคำนวณค่า $S_{W_{3,j}}$ แสดงในรูปที่ 6.30 และจากรูปพบว่าค่า $S_{W_{3,j}}$ มีค่าอยู่ระหว่าง $-0.22 - +0.2$ โดยสายส่งเส้นทางที่ 3 ให้ค่าต่ำสุดที่ -0.2241 และสายส่งเส้นทางที่ 5 ให้ค่าสูงสุดที่ 0.1905 เพื่อให้การชดเชยสายส่งมีผลต่อ Power Flow มากที่สุด จึงเลือกติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งเส้นทางที่ 3 ที่ระดับการชดเชยร้อยละ 40 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 6.31 – 6.32 และตารางที่ 6.8



รูปที่ 6.30 Sensitivity of line 3 flow to the series compensation (ระบบ IEEE 9 BUS)



รูปที่ 6.31 เปรียบเทียบราคาตลาดของระบบ ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 9 BUS)



รูปที่ 6.32 เปรียบเทียบความต่างของราคา ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 9 BUS)

จากการผลการทดลองปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งเส้นทางที่ 3 ของระบบทดสอบ IEEE 9 BUS โดยชดเชยที่ระดับ 40 % ผลการคำนวณประกอบด้วย ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ความสูญเสียของระบบ ราคาตลาดของไฟฟ้า และความต่างของราคาตลาด ดังแสดงในตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ผลการทดลองปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 9 BUS

การชดเชย	ต้นทุนการผลิต (THB/hr)	ความสูญเสีย ของระบบ (MW)	ความต่างของ ราคาตลาดสูงสุด (THB/MWhr)	ราคาตลาดของไฟฟ้า	
				ค่าต่ำสุด (THB/MWhr)	ค่าสูงสุด (THB/MWhr)
ปกติ	113,421.56	5.52	30.743	521.10	556.43
40 %	113,379.82	5.45	30.167	521.66	556.67

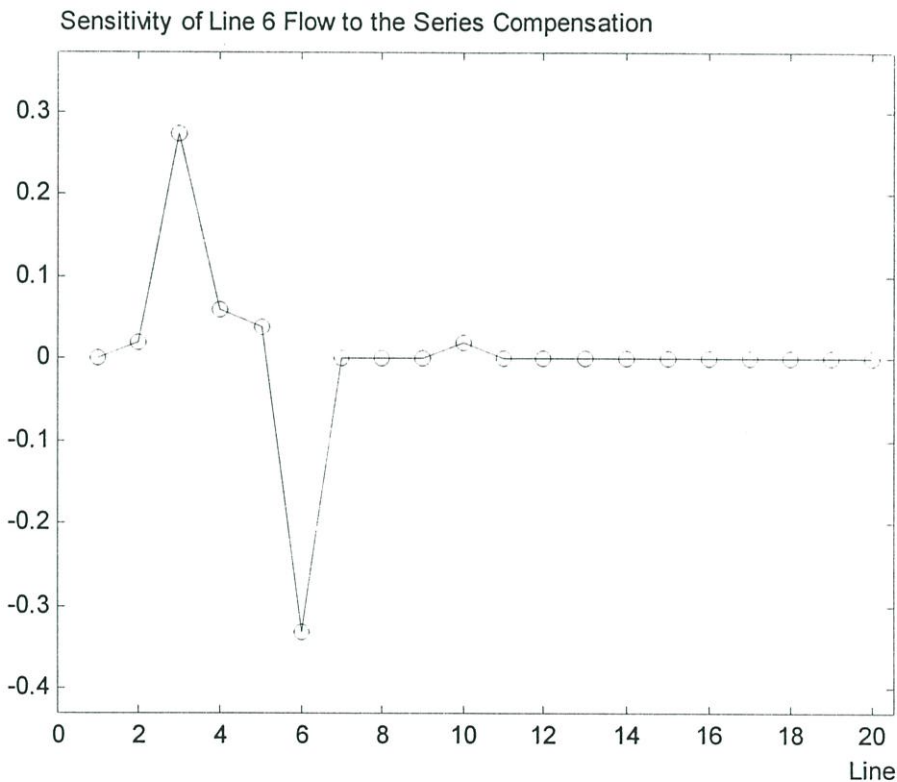
* หมายเหตุ

การชดเชยสายส่งไฟฟ้าร้อยละ 40 หมายถึง การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ที่มีค่า jX_c เท่ากับ ร้อยละ 40 ของ line reactance ของสายส่งไฟฟ้าในภาวะปกติ

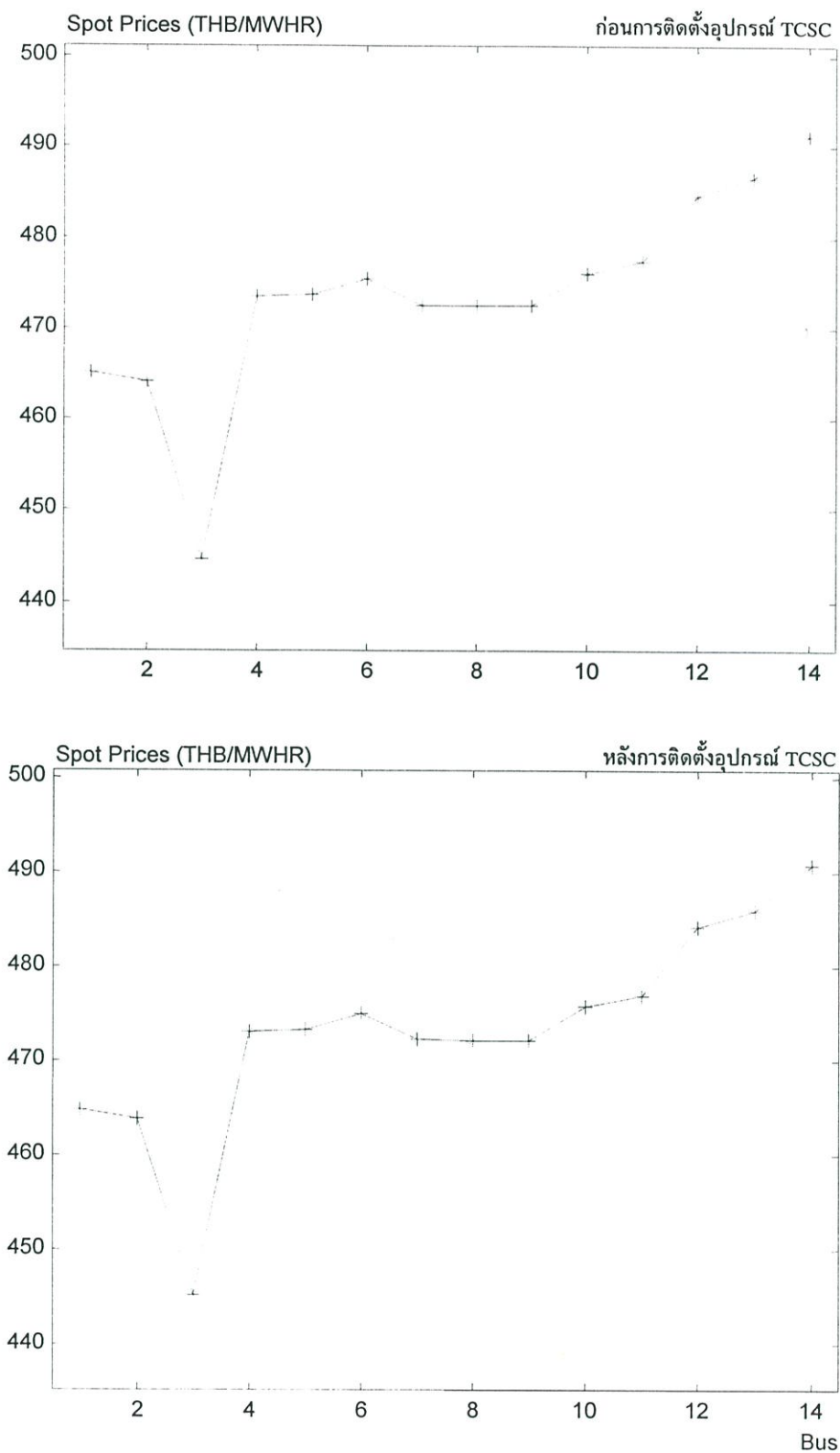
ผลการทดลองจากตารางที่ 6.8 พบว่า ความสูญเสียของระบบลดลงร้อยละ 1.27 จากเดิม 5.52 MW และต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าลดลงร้อยละ 10 จากเดิม 113,421.56 บาท/ชม. ส่วนราคาตลาดของไฟฟ้าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย โดยมีราคาเท่ากับ 521 บาท/MWhr สำหรับค่าต่ำสุด และเท่ากับ 556 บาท/MWhr สำหรับค่าสูงสุด ในขณะที่ความต่างของราคาตลาดสูงสุดปรับตัวลดลงเพียงร้อยละ 2 จากเดิม 30.743 บาท/MWhr จากผลลัพธ์เหล่านี้จะเห็นได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 9 BUS มีผลต่อราคาตลาดและความต่างของราคาตลาดไม่มากนัก

6.6 กรณีศึกษา การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 14 BUS

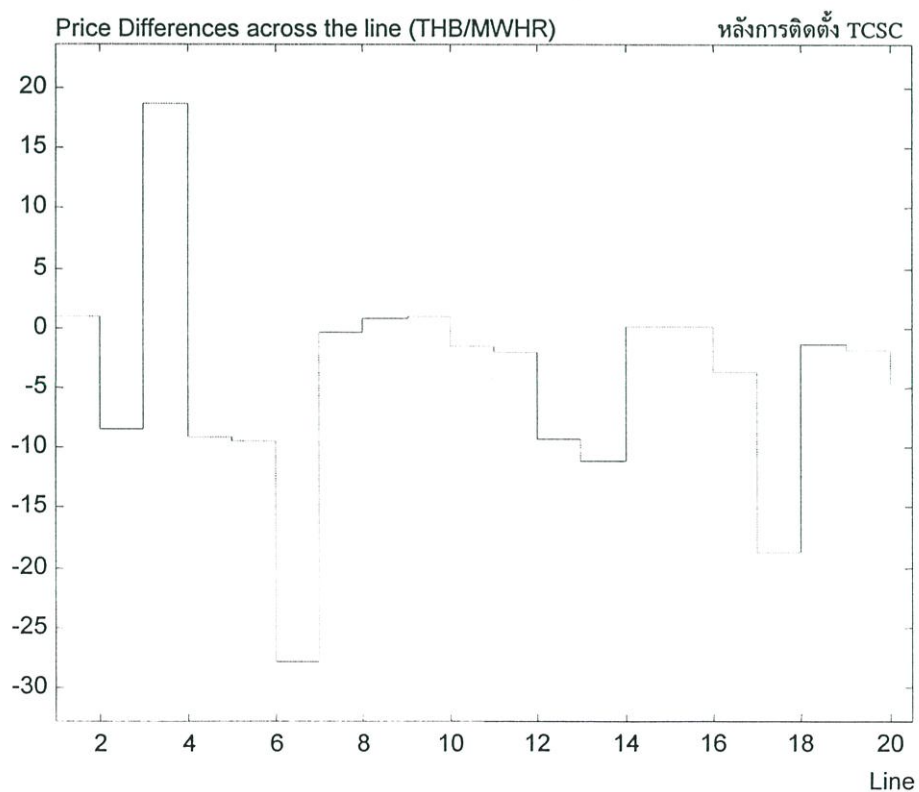
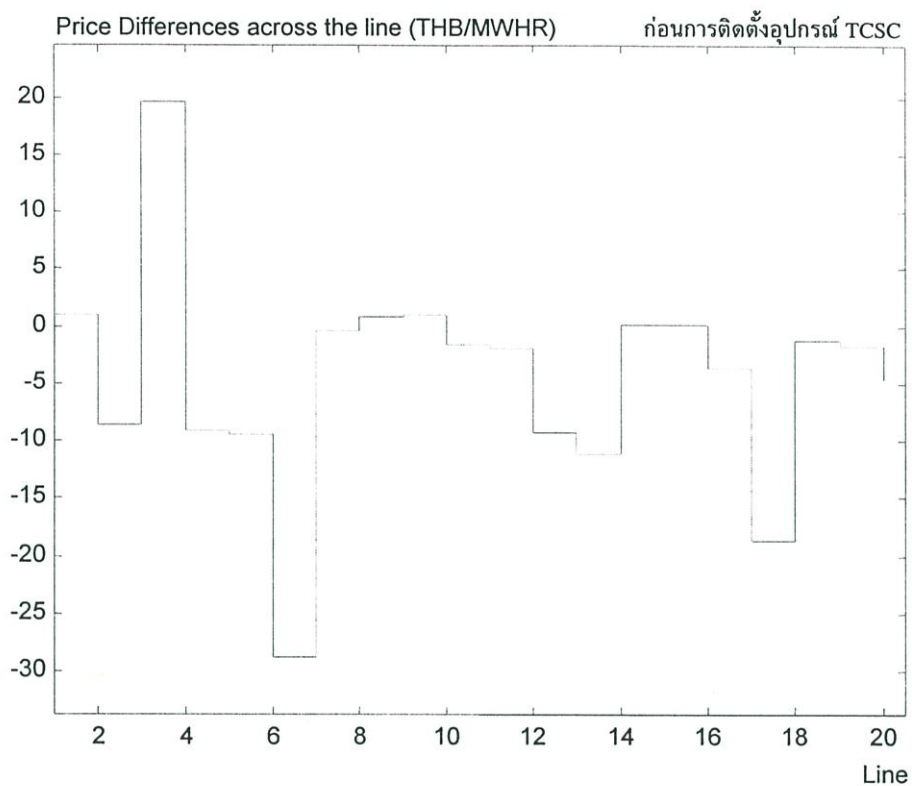
สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 14 BUS ผลการคำนวณในหัวข้อที่ 6.2 ราคาตลาดของไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 445 - 491 THB/MWhr โดยค่าความต่างของราคามีค่าสูงสุดที่ประมาณ 28.736 THB/MWhr บนสายส่งเส้นทางที่ 6 ระหว่างบัส 3 และ 4 การปรับลดค่าความต่างของราคาบนสายส่งไฟฟ้าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC มีความจำเป็นต้องพิจารณาค่า Sensitivity of line flow to the series compensation: $S_{W_{k,j}}$ ของสายส่งเส้นทางนี้ร่วมด้วย โดยผลการคำนวณค่า $S_{W_{6,j}}$ แสดงในรูปที่ 6.33 และจากรูปพบว่าค่า $S_{W_{6,j}}$ มีค่าอยู่ระหว่าง -0.33 - +0.27 โดยสายส่งเส้นทางที่ 6 ให้ค่าต่ำสุดที่ -0.3305 และสายส่งเส้นทางที่ 3 ให้ค่าสูงสุดที่ 0.2722 เพื่อให้การชดเชยสายส่งมีผลต่อ Power Flow มากที่สุด จึงเลือกติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งเส้นทางที่ 6 ระดับการชดเชยร้อยละ 40 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 6.34 - 6.35 และตารางที่ 6.9



รูปที่ 6.33 Sensitivity of line 6 flow to the series compensation (ระบบ IEEE 14 BUS)



รูปที่ 6.34 เปรียบเทียบราคาตลาดของระบบ ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 14 BUS)



รูปที่ 6.35 เปรียบเทียบความต่างของราคา ก่อนและหลังการติดตั้ง TCSC (IEEE 14 BUS)

จากการผลการทดลองปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งเส้นทางที่ 6 ของระบบทดสอบ IEEE 14 BUS โดยชดเชยที่ระดับ 40 % ผลการคำนวณประกอบด้วย ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ความสูญเสียของระบบ ราคาตลาดของไฟฟ้า และความต่างของราคาตลาด ดังแสดงในตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 ผลการทดลองปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 14 BUS

การชดเชย	ต้นทุนการผลิต (THB/hr)	ความสูญเสีย ของระบบ (MW)	ความต่างของ ราคาตลาดสูงสุด (THB/MWhr)	ราคาตลาดของไฟฟ้า	
				ค่าต่ำสุด (THB/MWhr)	ค่าสูงสุด (THB/MWhr)
ปกติ	82,247.76	3.33	28.736	444.68	491.19
40 %	82,205.29	3.25	27.990	445.27	490.81

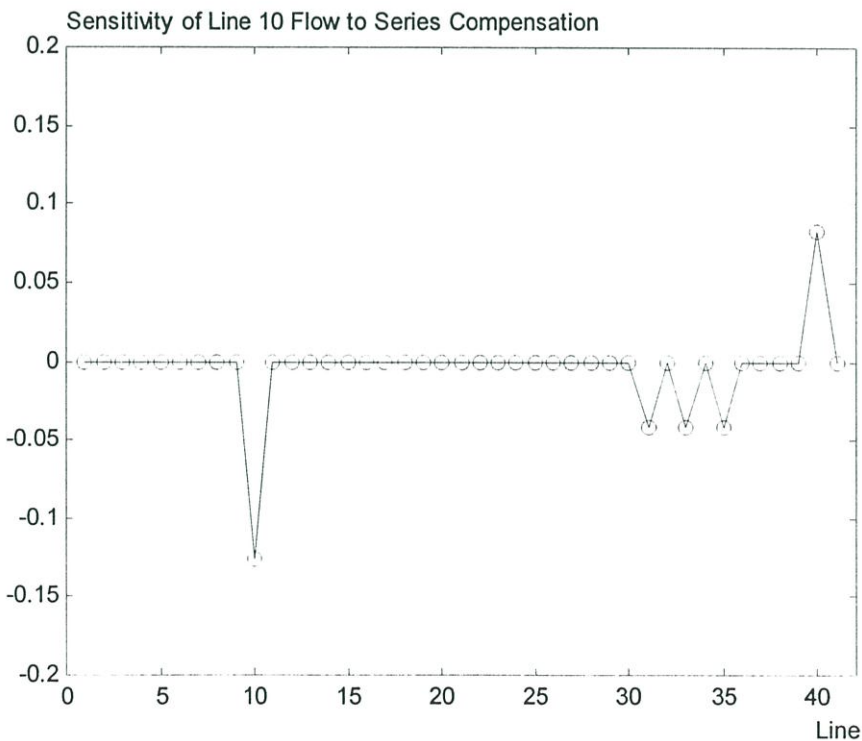
* หมายเหตุ

การชดเชยสายส่งไฟฟ้าร้อยละ 40 หมายถึง การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ที่มีค่า jX_C เท่ากับ ร้อยละ 40 ของ line reactance ของสายส่งไฟฟ้าในภาวะปกติ

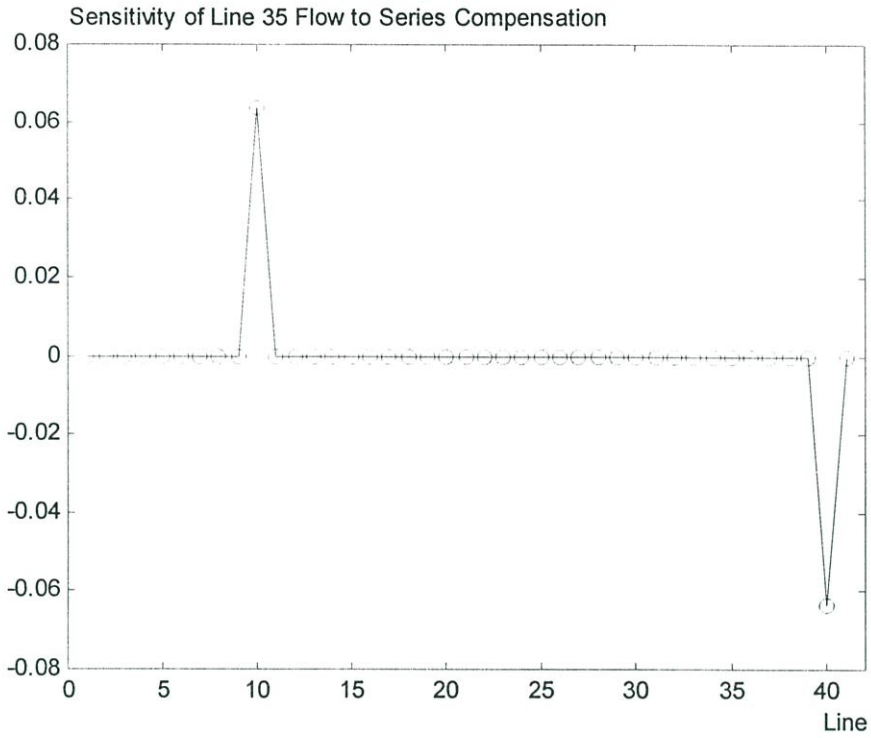
ผลการทดลองจากตารางที่ 6.9 พบว่า ความสูญเสียของระบบลดลงร้อยละ 2.4 จากเดิม 3.33 MW และต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้านลดลงร้อยละ 17.14 จากเดิม 82,247.76 บาท/ชม. ส่วนราคาตลาดของไฟฟ้าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย โดยมีราคาประมาณ 445 บาท/MWhr สำหรับค่าต่ำสุด และประมาณ 491 บาท/MWhr สำหรับค่าสูงสุด ในขณะที่ความต่างของราคาตลาดสูงสุดปรับตัวลดลงเพียงร้อยละ 2.6 จากเดิม 28.736 บาท/MWhr จากผลลัพธ์เหล่านี้จะเห็นได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 14 BUS มีผลต่อราคาตลาดและความต่างของราคาตลาดไม่มากนัก

6.7 กรณีศึกษา การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 BUS

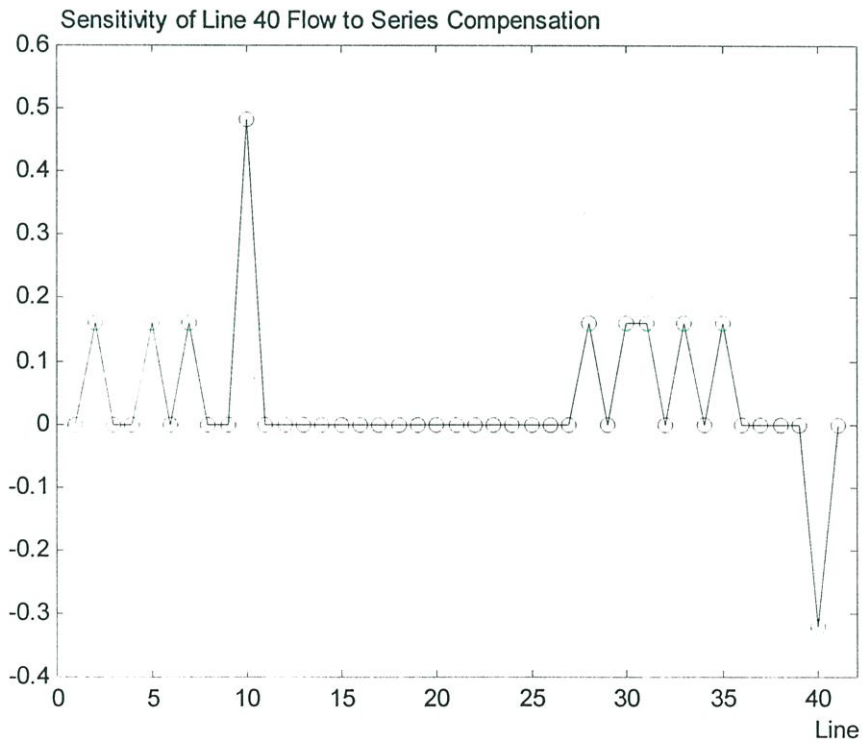
สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS ผลการคำนวณในหัวข้อ 6.2 โดยพิจารณา รูปที่ 6.17 – 6.18 ราคาตลาดของไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 440 – 550 THB/MWhr และมีเพียง 3 บัส ที่ราคาสูงกว่าปกติ นั่นคือ บัสที่ 6, 26 และ 28 โดยค่าความต่างของราคาส่วนใหญ่ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 20 THB/MWhr MWhr และมีสายส่งเพียง 3 เส้นทาง ที่มีค่าความต่างสูงมาก นั่นคือ เส้นทางที่ 10, 35 และ 40 โดยมีค่าสูงสุดที่ 567.25 THB/MWhr บนสายส่งเส้นทางที่ 10 ระหว่างบัส 6 และ 8 การปรับลดค่าความต่างของราคาบนสายส่งไฟฟ้าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC มีความจำเป็นต้องพิจารณาค่า Sensitivity of line flow to the series compensation: $S_{W_{k,j}}$ ของสายส่ง เส้นทางทั้งสามเส้นทางนี้ร่วมด้วย โดยผลการคำนวณค่า $S_{W_{k,j}}$ ทั้งหมดแสดงในรูปที่ 6.36 – 6.38 พบว่า ค่า $S_{W_{10,j}}$ มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.1255 ที่สายส่งเส้นทางที่ 10 สำหรับค่า $S_{W_{35,j}}$ สายส่งเส้นทางที่ 10 ให้ค่าสูงสุดที่ 0.0637 และสายส่งเส้นทางที่ 40 ให้ค่าต่ำสุดที่ -0.0637 ส่วนค่า $S_{W_{40,j}}$ สายส่งเส้นทางที่ 40 ให้ค่าต่ำสุดที่ -0.32206 จากข้อมูลเหล่านี้เพื่อให้การชดเชยสายส่งมีผลต่อ Power Flow สูงสุด จึงได้เลือกติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งเส้นทางที่ 10 และ 40 ระดับการชดเชยร้อยละ 40, 50 และ 60 ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 6.39 – 6.42 และตารางที่ 6.10



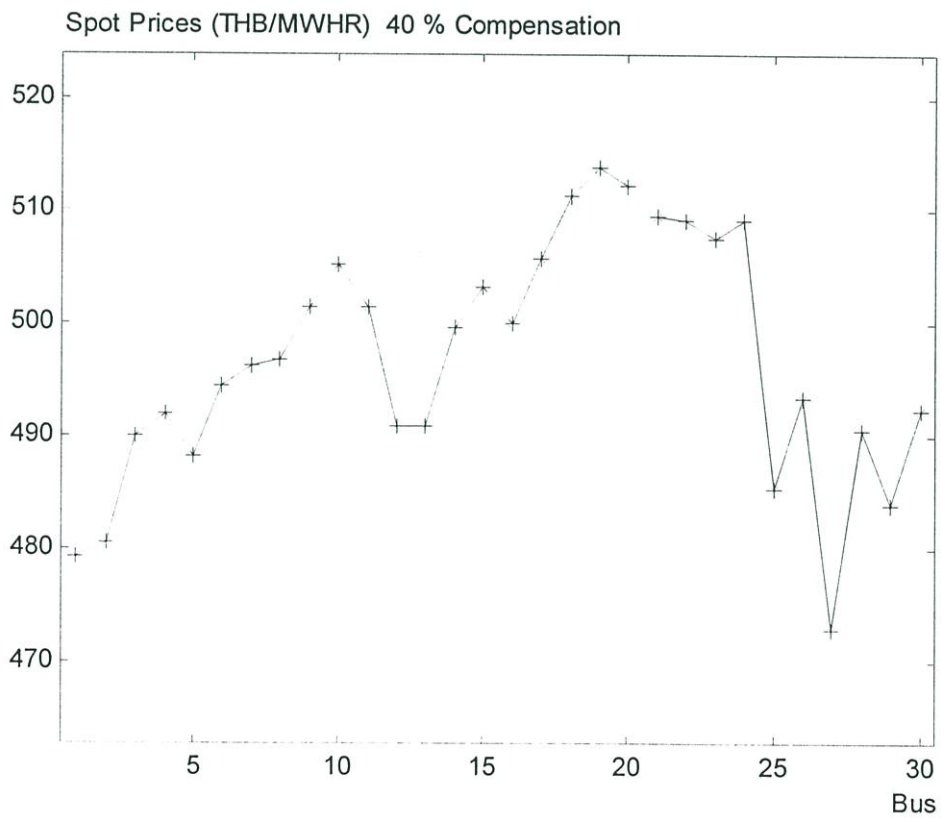
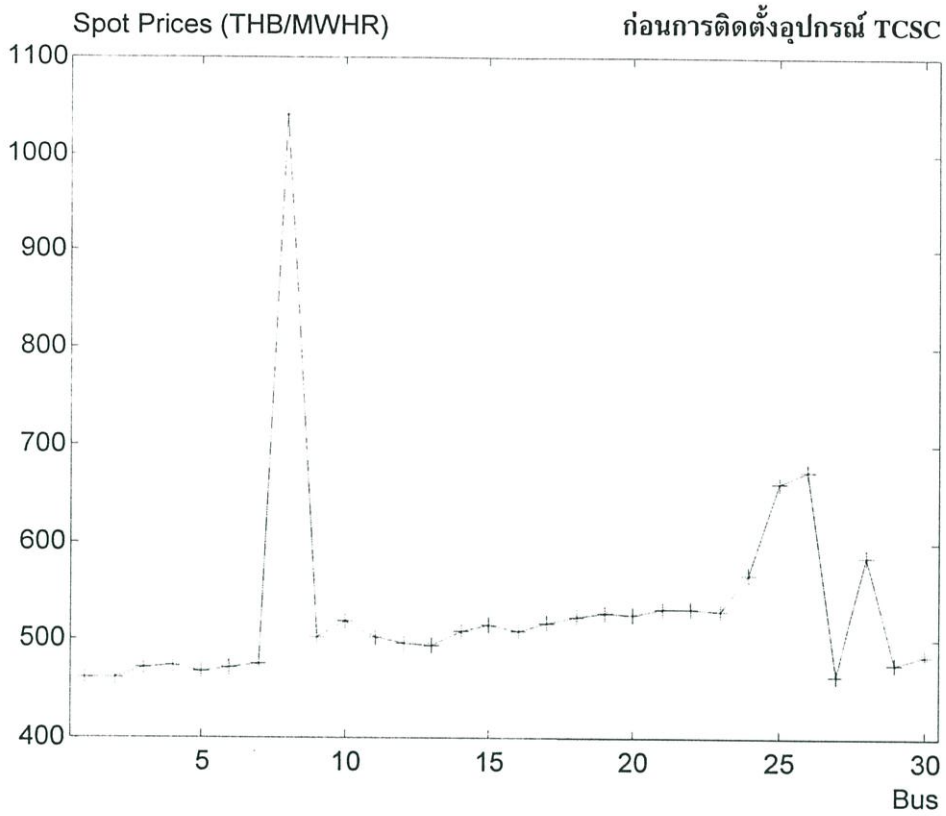
รูปที่ 6.36 Sensitivity of line 10 flow to the series compensation (ระบบ IEEE 30 BUS)



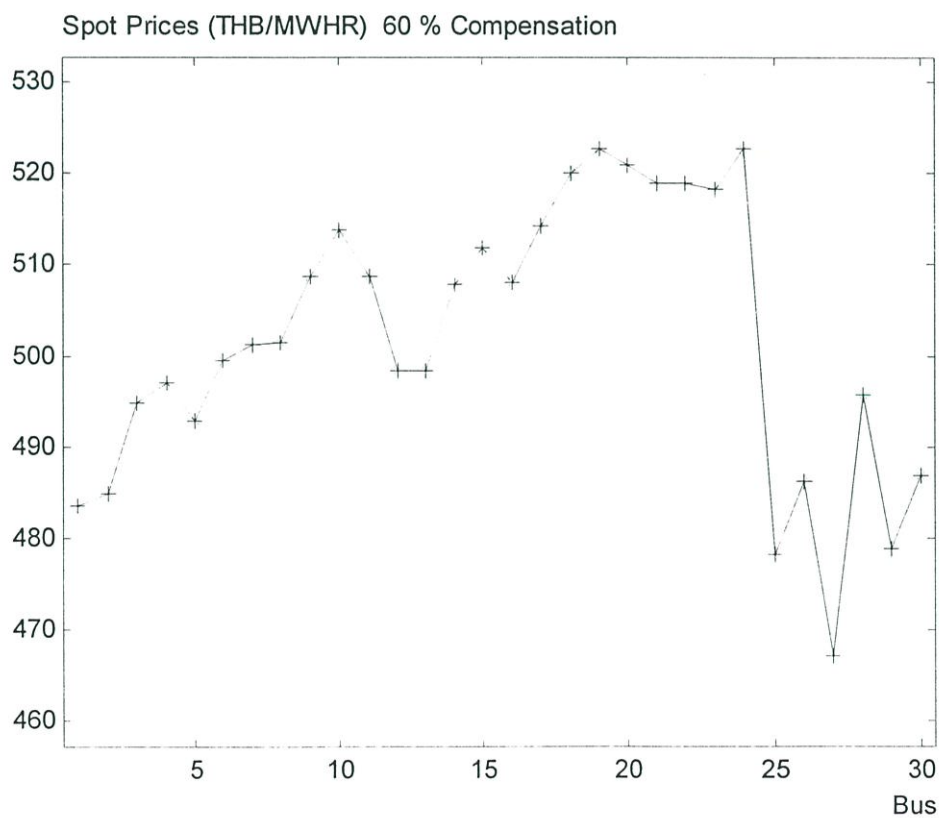
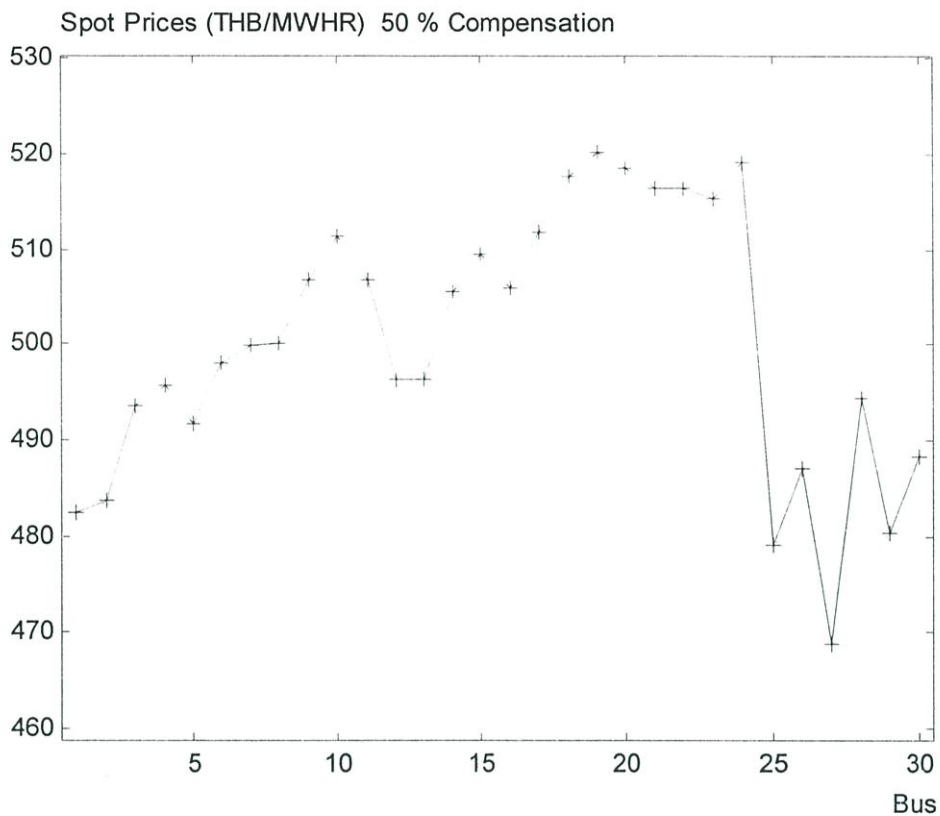
รูปที่ 6.37 Sensitivity of line 35 flow to the series compensation (ระบบ IEEE 30 BUS)



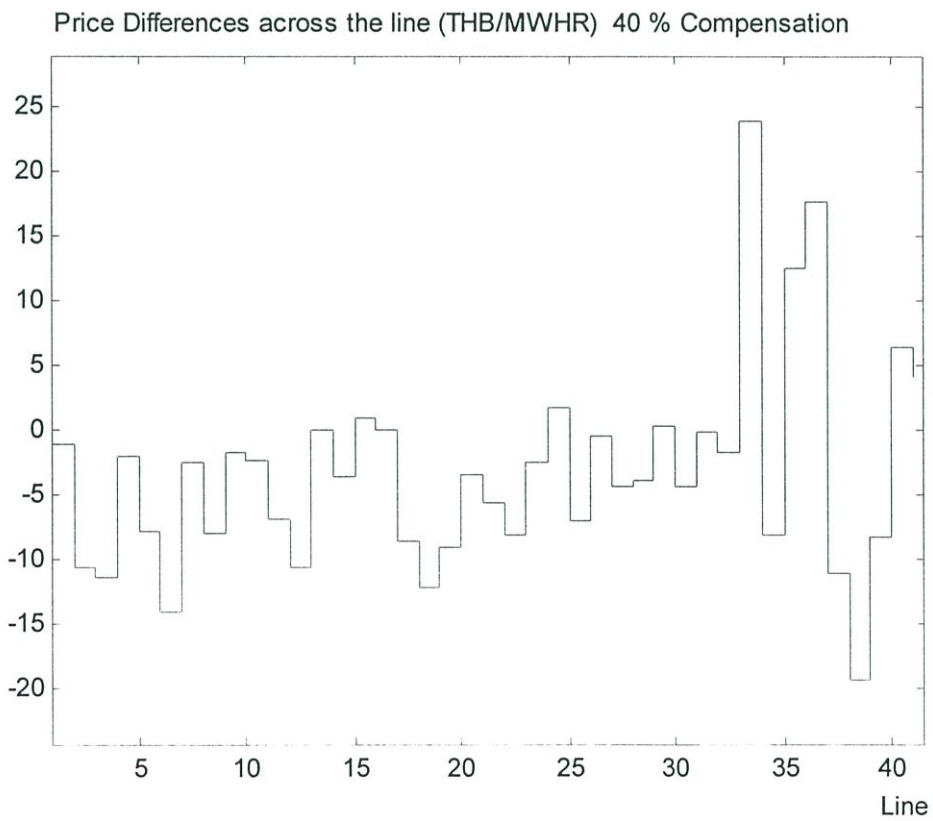
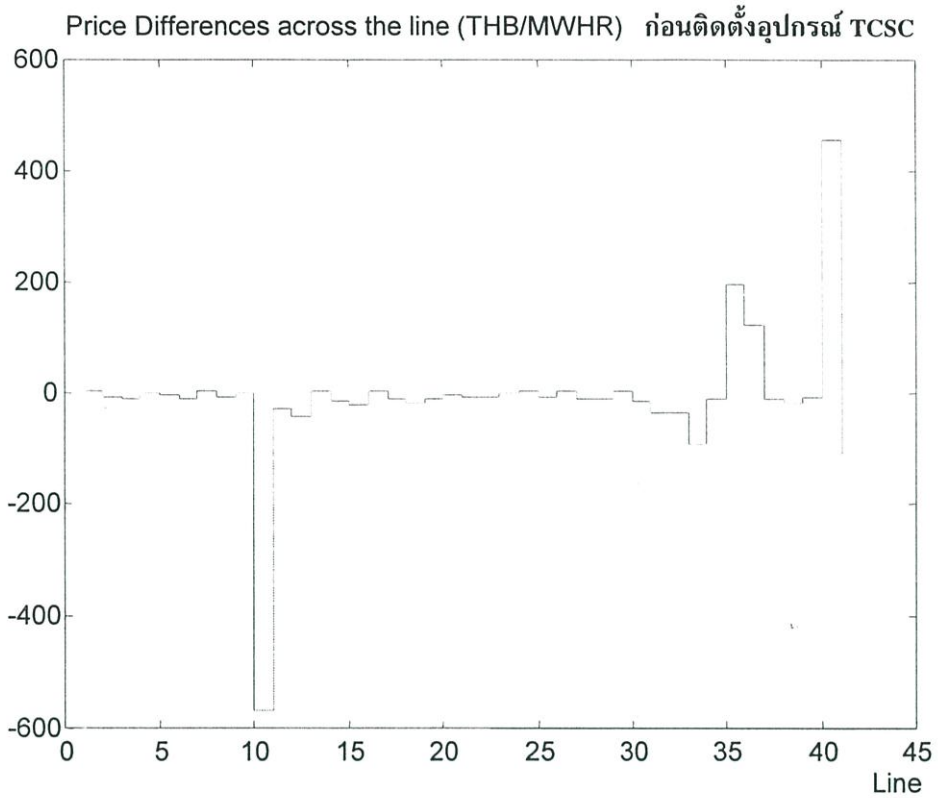
รูปที่ 6.38 Sensitivity of line 40 flow to the series compensation (ระบบ IEEE 30 BUS)



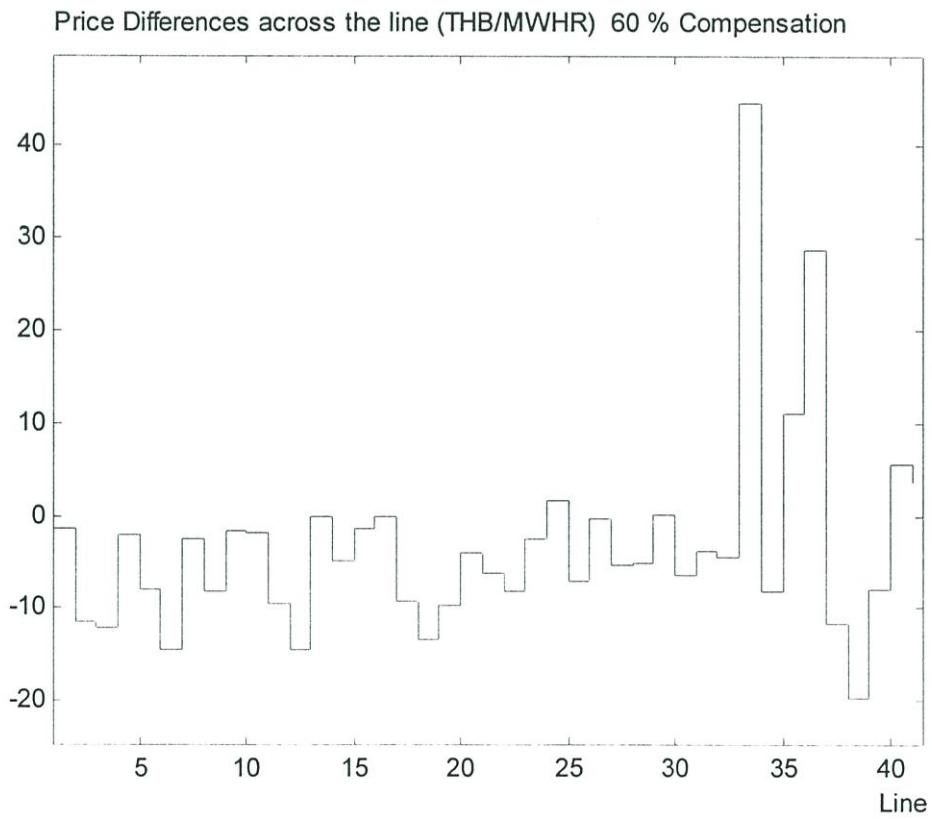
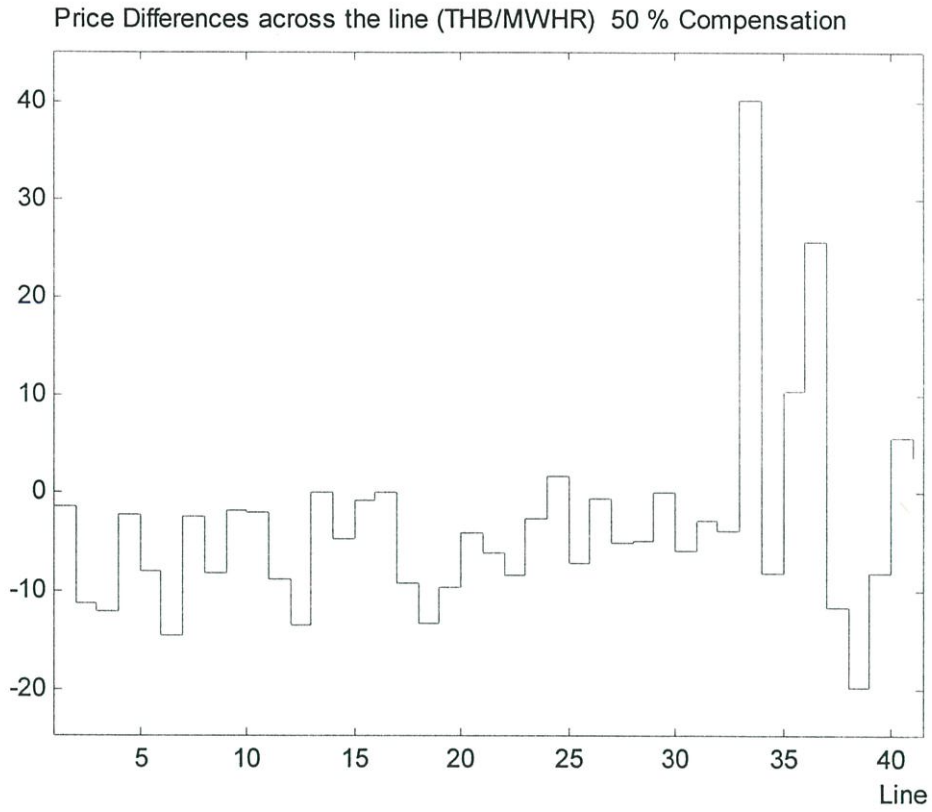
รูปที่ 6.39 ราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 BUS ก่อนและหลังการชดเชย 40 %



รูปที่ 6.40 ราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 BUS หลังการชดเชย 50 และ 60 %



รูปที่ 6.41 ความต่างของราคาตลาดของระบบ IEEE 30 BUS ก่อนและหลังการชดเชย 40 %



รูปที่ 6.42 ความต่างของราคาตลาดของระบบ IEEE 30 BUS หลังการชดเชย 50 และ 60 %

จากการผลการทดลองติดตั้งอุปกรณ์ TCSC โดยชดเชยสายส่งไฟฟ้าที่ 40, 50 และ 60 % มีผลการคำนวณประกอบด้วย ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ความสูญเสียของระบบ ราคาตลาดของไฟฟ้า และความต่างของราคาตลาด ดังแสดงในตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ผลการทดลองปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 BUS

การชดเชย	ต้นทุนการผลิต (THB/hr)	ความสูญเสีย ของระบบ (MW)	ความต่างของ ราคาตลาดสูงสุด (THB/MWhr)	ราคาตลาดของไฟฟ้า	
				ค่าต่ำสุด (THB/MWhr)	ค่าสูงสุด (THB/MWhr)
ปกติ	45,258.76	3.51	567.25	461.41	1,039.90
40 %	44,402.87	3.41	23.92	472.87	513.85
50 %	44,417.92	3.50	40.15	468.74	520.28
60 %	44,443.64	3.53	44.49	467.23	522.65

* หมายเหตุ

การชดเชยสายส่งไฟฟ้าร้อยละ 40 หมายถึง การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ที่มีค่า jX_C เท่ากับ ร้อยละ 40 ของ line reactance ของสายส่งไฟฟ้าในภาวะปกติ

ผลการทดลองจากตารางที่ 6.5 พบว่า ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าปรับตัวลดลงประมาณร้อยละ 2 จากเดิม 45,258.76 บาท/ชม. ที่ระดับการชดเชยร้อยละ 40 และปรับตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ระดับการชดเชยร้อยละ 50 และ 60 ความสูญเสียของระบบลดลงมาต่ำสุดที่ประมาณร้อยละ 2.85 จากเดิม 3.51 MW ส่วนราคาตลาดของไฟฟ้าปรับตัวลดลงจากเดิมที่ 461.41 - 1,039.90 บาท/MWhr ลงมาที่ระดับ 472.87 - 513.85 บาท/MWhr ที่ระดับการชดเชยร้อยละ 40 และที่ 468.74 - 520.28 และ 467.23 - 522.65 บาท/MWhr ที่ระดับการชดเชยร้อยละ 50 และ 60 ตามลำดับ ค่าความแตกต่างของราคาตลาดหรืออีกนัยหนึ่งหมายถึงต้นทุนในการส่งกำลังไฟฟ้า [51] ปรับตัวลดลงอย่างมากจากเดิมที่ 567.25 บาท/MWhr ลดลงอย่างมากมาอยู่ที่ 23.92 บาท/MWhr สำหรับระดับการชดเชยร้อยละ 40 และที่ 40.15 และ 44.49 บาท/MWhr สำหรับระดับการชดเชยร้อยละ 50 และ 60 ตามลำดับ การปรับตัวลดลงของราคาตลาดเนื่องจากชดเชยสายส่งไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ TCSC จึงถือว่าได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุปเนื้อหา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า หรือ กิจการไฟฟ้าที่สามารถพิจารณาเป็นปัญหาที่ขยายผลจากออปติมอลพาวเวอร์โพล์ และด้วยพจน์ของความหมายทางเศรษฐศาสตร์ ตัวคุณลากรองจ์จะเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า รายละเอียดของกิจการไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็น โครงสร้างกิจการไฟฟ้า การค้าของตลาดขายส่งไฟฟ้า และตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า ได้อธิบายในบทที่ 2 ในขณะที่ การคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า ที่ประกอบด้วย ราคาไฟฟ้าสำหรับธุรกิจไฟฟ้า ราคาตลาดของไฟฟ้า ออปติมอลพาวเวอร์โพล์ ได้อธิบายในบทที่ 3 สำหรับขั้นตอนของการคำนวณได้ใช้โปรแกรมเชิงเส้นโดยใช้เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) ด้วยมีสาเหตุมาจาก โปรแกรมเชิงเส้นมีความเหมาะสมกับระบบสมการขนาดใหญ่ และเทคนิค PCPDIP ให้จำนวนรอบการคำนวณที่ไม่แปรผันโดยตรงกับขนาดของระบบสมการและใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Simplex Method และ Sequential Quadratic Programming รายละเอียดของเทคนิค PCPDIP ได้อธิบายในในบทที่ 4 และในบทที่ 5 เสนอการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) ซึ่งเป็นสมาชิกของอุปกรณ์ Flexible AC Transmission System (FACTS) ในประเภท Static Series Compensator เนื่องจากความคับคั่งบนสายส่งไฟฟ้าถือเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความต่างของราคาตลาดของไฟฟ้าซึ่งมีความหมายเท่ากับต้นทุนในการส่งกำลังไฟฟ้า การกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์ TCSC จึงพิจารณาจากค่า Sensitivity of Line Flow to the Series Compensation: $S_{W_{k,j}}$ โดยเลือกสายส่งไฟฟ้าในเส้นทางที่ให้ค่า $S_{W_{k,j}}$ สูงสุดในด้านลบ เนื่องจากมันให้ความหมายว่า การชดเชยสายส่งไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ TCSC (ซึ่งทำงานในช่วง Capacitive Region) จะทำให้สายส่งไฟฟ้าเส้นดังกล่าวมีค่า Power Flow มากยิ่งขึ้นและถือเป็นลดความคับคั่งของสายส่งไปด้วย สำหรับบทที่ 6 ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบของ IEEE ไม่ว่าจะเป็นระบบ 9, 14, 30, 57 และ 118 BUS ได้นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา โดยตัวอย่างต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และในตอนท้ายได้ทดลองปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าโดยการติดตั้ง TCSC โดยทดสอบกับระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 9 14 และ 30 BUS และด้วยความแตกต่างของราคาตลาดของระบบ IEEE 9 และ 14 BUS มีค่าไม่มากนัก ในขณะที่ ราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 BUS มีความแตกต่างอย่างมากบนสายส่งไฟฟ้า 2 - 3 เส้นทาง การทดลองปรับลดราคาจึงมุ่งศึกษาระบบ IEEE 30 BUS เป็นสำคัญ

7.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลอง (บทที่ 6) เริ่มจากการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมการคำนวณเทียบกับ Simulation Package [53] ในหัวข้อ 6.2 การคำนวณให้ผลที่ใกล้เคียงกันสำหรับผลลัพธ์ในส่วนของออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ และต่างกันเพียงเล็กน้อยในส่วนของราคาตลาดของไฟฟ้าซึ่งถือว่าน่าพอใจ การคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบที่แตกต่างกันแสดงในหัวข้อ 6.3 โดยระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9 BUS ราคาตลาดของไฟฟ้ามีอยู่ค่าระหว่าง 521 – 556 THB/MWhr ระบบ 14 BUS ราคาตลาดของไฟฟ้าส่วนมากมีค่าอยู่ระหว่าง 464 – 490 THB/MWhr มีเพียงบัส 3 มีราคาต่ำสุดที่ 445 THB/MWhr สำหรับระบบ 30 BUS ราคาตลาดของไฟฟ้าโดยส่วนมากมีค่าอยู่ในช่วง 440 – 550 THB/MWhr มีเพียงบัสที่ 8, 25 และ 26 ที่ให้ราคาสูงกว่าอย่างเด่นชัดโดยมีค่าเท่ากับ 1,039.89 , 661 และ 672 THB/MWhr ตามลำดับ สำหรับระบบ 57 BUS ราคาตลาดของไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกันในลักษณะเป็นกลุ่ม โดยกลุ่มแรกมีค่าอยู่ในช่วง 680 – 720 THB/MWhr สำหรับบัส 1 ถึง บัส 9 และสำหรับบัส 10 ถึง บัส 29 ราคาตลาดของไฟฟ้าอยู่ที่ 740 – 780 THB/MWhr มีเพียงบัส 18, 28 และ 29 ที่ให้ราคาต่างไป ที่ประมาณ 695 – 720 THB/MWhr และสำหรับบัส 30 ถึง 57 ราคาจะเกาะกลุ่มกับที่ประมาณ 820 THB/MWhr และค่อย ๆ ลดลงมาที่ 750 THB/MWhr และตอนสุดท้ายปรับตัวขึ้นไปอีกที่ราคาประมาณ 800 THB/MWhr สำหรับกรณีศึกษา ระบบ 118 BUS ราคาตลาดของไฟฟ้าโดยส่วนมากมีการปรับตัวขึ้นลงในลักษณะเป็นกลุ่มโดยเริ่มที่ราคาประมาณ 450 THB/MWhr โดยมีแนวโน้มลดลงมาจนกระทั่งถึงจุดต่ำสุดที่บัส 111 ที่ราคา 323 THB/MWhr และพุ่งขึ้นไปจับกลุ่มที่ประมาณ 430 THB/MWhr สำหรับบัส 113 – 118

สำหรับการคำนวณได้ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีหน่วยประมวลผล PENTIUM 450 MHz RAM 196 MB ความสามารถของเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) ได้แสดงในหัวข้อ 6.3 โดยเปรียบเทียบกับเทคนิค Sequential Quadratic Programming (SQP) และ Simplex-based Linear Programming (SPLP) เมื่อพิจารณาจำนวนรอบการคำนวณพบว่า เทคนิค PCPDIP ได้ให้จำนวนรอบที่ไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เทคนิค PCPDIP อาจให้ผลลัพธ์ที่ด้อยกว่าสำหรับระบบขนาดเล็ก แต่สำหรับระบบขนาดใหญ่ มันได้แสดงความสามารถที่เหนือกว่าเทคนิค SQP และ SPLP อย่างเด่นชัด

การทดลองปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่ง ได้เลือก ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 9 BUS, 14 BUS และ 30 BUS เป็นกรณีศึกษา ด้วยความแตกต่างของราคาตลาดของไฟฟ้าเกิดจากความคับคั่งของสายส่งไฟฟ้าเป็นสำคัญ และเพื่อเป็นการลดความคับคั่งอันนี้ จำเป็นต้องพิจารณาค่า $S_{w_{k,l}}$ ประกอบการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ผลลัพธ์ที่ได้สำหรับระบบ 9 และ 14 BUS คือ ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของระบบลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ราคาตลาดและความแตกต่างของราคาตลาดแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย แต่สำหรับระบบ 30 BUS ราคาตลาดและความแตกต่างของราคาตลาดของไฟฟ้าหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ได้มี

การเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยราคาได้มีการปรับตัวลดลงมาอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ความสูญเสียของระบบและต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าก็มีการปรับตัวลดลง เช่นเดียวกับกับระบบ 9 และ 14 BUS และทั้งนี้ หากมีการศึกษาความคุ้มทุนร่วมด้วย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ โดยใช้กับสายส่งไฟฟ้าในเส้นทางที่มีความคับคั่ง ไม่ว่าจะเป็นสายส่งของสถานีไฟฟ้าแรงสูงตาก 1 และภูมิพลในระดับแรงดัน 115 kV เป็นต้น

7.3 คำแนะนำสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ด้วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขัน การคำนวณราคาค่าไฟฟ้า ออปติมอลพาวเวอร์โพลว์ และการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ TCSC ในกิจการไฟฟ้า งานวิจัยที่สามารถพัฒนาต่อจากวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย

เศรษฐศาสตร์ระบบกำลังไฟฟ้า

อุปกรณ์ TCSC สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำมาใช้เพื่อมุ่งลดองค์ประกอบของราคาตลาดของไฟฟ้า อันเนื่องมาจากความคับคั่งบนสายส่ง นอกจากนี้ สิ่งที่ควรมีการศึกษาอีกอย่างคือ การกำหนดติดตั้งอุปกรณ์ TCSC โดยมุ่งให้เกิดประโยชน์สูงสุดในทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อลดความสูญเสียของระบบและต้นทุนในการผลิตกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้ ควรมีการพิจารณาข้อมูลด้านราคาอุปกรณ์ TCSC ของผู้ผลิตประกอบด้วย

การปรับความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า

ปัจจุบันแนวโน้มของการเชื่อมโยงกิจการไฟฟ้าระหว่างประเทศมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น การใช้ อุปกรณ์ TCSC ถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจอันหนึ่งสำหรับการเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า (Available Transfer Capability) ระหว่างระบบกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นต้องมีการซื้อขายผ่านระบบอื่น เนื่องจากที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ไม่เอื้ออำนวย งานวิจัยเกี่ยวกับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ TCSC เพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า จึงเป็นงานที่น่าสนใจอีกด้านหนึ่ง

คุณภาพของการส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบ

ปัจจุบันในหลายประเทศ การตกลงซื้อขายไฟฟ้าอยู่ในรูปสัญญาลักษณะที่แตกต่างกัน คุณภาพของการส่งกำลังไฟฟ้าถือเป็นประเด็นหนึ่งที่มีการกล่าวถึงในข้อสัญญา การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าระหว่างประเทศ (Cross-bordered Transmission Line) เพื่อควบคุมการซื้อขายและคุณภาพในการส่งกำลังไฟฟ้า ตลอดจนการป้องกันสายส่งไฟฟ้าจาก Fault หรือ Disturbance ถือเป็นอีกหัวข้อที่ควรมีการศึกษาอย่างจริงจัง ทั้งในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ เพื่อชี้แสดงให้เห็นคุณประโยชน์ที่ได้อย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Marcel A. Lamoureaux. 2001. "Evaluation of electric utility restructuring in the UK." **IEEE Power Engineering Review**. 21(6) : 6 – 9.
- [2] H. Rudnick and J. Zolezzi. 2001. "Electric sector deregulation and restructuring in Latin America: lessons to be learnt and possible ways forward." **IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution**. 148(2) : 180 – 184.
- [3] H. Rudnick. 1996. "Pioneering Electricity Reform in South America." **IEEE Spectrum**. 33(8) : 38 – 44.
- [4] T. James. Hammons. 2000. "Eastern and Western European Policy on Electricity Infrastructure, Interconnections and Electricity Exchanges." **IEEE Transaction on Energy Conversion**. 15(3) : 328 – 341.
- [5] W. Mielczarski. 1997. "Introducing Open Electricity Markets." 451 – 456. in **Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management**. Vol. 2. Hong Kong : APSCOM-97.
- [6] R. D. Christie and I. Wangensteen. 1998. "The Energy Market in Norway and Sweden: introduction." **IEEE Power Engineering Review**. 18(2) : 44 – 45.
- [7] B. B. Barkovich. 1996. "Electric Power Deregulation – End of Monopoly." 315 – 321. in **38th IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference**.
- [8] N. Leepreechanon *et al.* 1998. "Restructuring of electricity supply industry in developing countries: lessons from Thailand." 506 in **Portland International Conference on Management of Engineering and Technology**. Portland : PICMET.
- [9] Electricity Generation Authority of Thailand. "Long Term Electricity Supply Industry." [Online]. Available : <http://www.egat.or.th/esi/>. 1999.
- [10] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. "การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าและการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า". [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.nepo.go.th/power/FF/pw-reform-index.html>. 2543.
- [11] Sally Hunt and Graham Shuttleworth. 1996. **Competition and Choice in Electricity**. West Sussex : John Wiley & Sons.
- [12] Peter C Christensen. 1995. **Retail Wheeling**. Oklahoma : PennWell Publishing Company.
- [13] William W. Hogan. 1993. **A Competitive Electricity Market Model**. Massachusetts : Harvard University Press.

- [14] B. Peter Pashigian. 1997. **Price Theory and Application 2nd Edition**. Chicago : McGraw-Hill.
- [15] Ralph Turvey. 1997. "Regulation and Electricity Prices." **Power Engineering Journal**. 11(2) : 58 – 63.
- [16] Fred C. Schweppe *et. al.* 1988. **Spot Pricing of Electricity**. Massachusetts : Kluwer Academic Publisher.
- [17] Chen Luonan *et al.* 2002. "Components of Nodal Prices for Electric Power System." **IEEE Transactions on Power System**. 17(1) : 44 – 49.
- [18] Panos Y. Papalambros and Douglass J. Wilde. 1988. **Principles of Optimal Design : Modeling and Computation**. Cambridge : The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- [19] Hans Glavitsch and Rainer Bacher. 1997. **Optimal Power Flow Algorithm**. Zurich : Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [20] Yan Ping. 1997. "Optimal Power Flow Studies." Special Study Report of Asian Institute of Technology. Bangkok.
- [21] James D. Webber. "Implementation of A Newton-Based Optimal Power Flow into A Power System Simulation Environment." Master Thesis of University of Illinois at Urbana-Champaign. 1997.
- [22] Maxwell G. Dondo and M. E. El-Hawary. 1995. "Real-Time Electricity Pricing Using a Neural Network Approach." 358 – 361 in **IEEE 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**. Vol. 1. Nova Scotia.
- [23] Maxwell G. Dondo and M. E. El-Hawary. 1996. "Application of Fuzzy Logic to Electricity Pricing in a Deregulated Environment." 388 – 391 in **IEEE 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**. Vol. 1. Nova Scotia.
- [24] Chira Achayuthakan. 1996. "Genetic Algorithms Application to Optimal Power Flow." Special Study Report of Asian Institute of Technology. Bangkok.
- [25] Ray D. Zimmerman and Deqiang Gan. 1997. **Matpower Version 2.0 User's Manual**. New York : Power System Engineering Research Center – Cornell University.
- [26] S. G. Nash and A. Sofer. 1996. **Linear and Nonlinear Programming**. Singapore : McGraw-Hill.

- [27] O. Alsac, J Bright, M. Prais and B. Stott. 1990. "Further Developments in LP-Based Optimal Power Flow." **IEEE Trans. on Power Systems.** 5(3) : 697 – 711.
- [28] Jerome K. Delson and S. M. Shahidehpour. 1992. "Linear Programming Applications To Power System Economics, Planning and Operations." **IEEE Trans. on Power Systems.** 7(3) : 1155 – 1163.
- [29] Greg Astfalk, Irvin Lustig, Roy Marsten and David Shanno. 1992. "The Interior-Point Method for Linear Programming." **IEEE Software.** 9(4) : 61 – 68.
- [30] J. A. Momoh and J. Z. Zhu. 1999. "Improved Interior Point Method." **IEEE Trans. on Power Systems.** 14(3) : 1114 – 1120.
- [31] K. Ponnambalam, V. H. Quintana and A. Vannelli. 1991. "A Fast Algorithm for Power System Optimization Problems Using An Interior Point Method." 393 – 400 in **1991 Power Industry Computer Application.**
- [32] James A. Momoh, Roger F. Austin, Rambabu Adapa and E. C. Ogbuobiri. 1992. "Application of Interior Point Method to Economic Dispatch." 1096 – 1101 in **IEEE International Conference on System, Human and Cybernetics.**
- [33] Anthony Vannelli. 1993. "Teaching Large-Scale Optimization by an Interior Point Approach." **IEEE Trans. on Education.** 36(1) : 204 – 209.
- [34] Geraldo L. Torres and Victor H. Quintana. 1996. "Optimal Power Flow via Interior Point Methods: An Education Tool in Matlab." 996 – 999 in **IEEE 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering.**
- [35] Rainer Bacher. 1997. **The Optimal Power Flow (OPF) and its solution by the Interior Point Approach.** Zurich : Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [36] James A. Momoh, M. E. El-Havary and R. Adapa. 1999. "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part I: NonLinear and Quadratic Programming Approaches." **IEEE Trans. on Power Systems.** 14(1) : 96 – 104.
- [37] James A. Momoh, M. E. El-Havary and R. Adapa. 1999. "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods." **IEEE Trans. on Power Systems.** 14(1) : 105 – 111.
- [38] X. Wang, Y. H. Song and Q Lu. 2002. "Primal-Dual Interior Point Linear Programming Optimal Power Flow for Real-Time Congestion Management." 1643 – 1649 in **2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.**

- [39] Yu-Chi Wu , Atif S. Debs and Roy E. Marsten. 1996. "A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flow." **IEEE Trans. on Power Systems.** 9(2) : 876 – 882.
- [40] Xihui Yan and Victor H. Quintana. 1997. "An Efficient Predictor-Corrector Interior Point Algorithm for Security-Constrained Economic Dispatch." **IEEE Trans. on Power Systems.** 12(2) : 803 – 809.
- [41] Luces M. Faulkenbury and Walter Coffey. 1996. **Electrical Power Distribution and Transmission.** New Jersey : McGraw-Hill.
- [42] P. Kundur. 1993. **Power System Stability and Control.** New York : McGraw-Hill.
- [43] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi. 1999. **Understanding FACTS.** New York : IEEE Press.
- [44] Ch. Schaffner and G. Andersson. 2001. "Value of Controllable Devices in a Liberalized Electricity Market." 15 – 20 in **Seventh International Conference on AC – DC Power Transmission.**
- [45] Arnim Herbig. "On Load Flow Control in Electric Power System." Doctoral Dissertation of Royal Institute of Technology (KTH). 2000.
- [46] Tina Orfanogianni. "A Flexible Software Environment for Steady-state Power Flow Optimization with Series FACTS Devices." Doctoral Dissertation of Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich. 2000.
- [47] S. N. Singh and A. K. David. 2001. "A New Approach for Placement of FACTS Devices in Open Power Market." **IEEE Power Engineering Review.** 21(1) : 58–60.
- [48] K. S. Verma, S. N. Singh and H. O. Gupta. 2001. "FACTS Devices Location for Enhancement of Total Transfer Capability." 522 – 527 in **2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.**
- [49] S. N. Singh and A. K. David. 2000. "Congestion Management by Optimising FACTS Devices Location." 23 – 28 in **2002 International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies.**
- [50] Wang Feng and G. B. Shrestha. 2001. "Allocation of TCSC devices to optimize total transmission capacity in a competitive power market." 587 – 593 in **2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.**

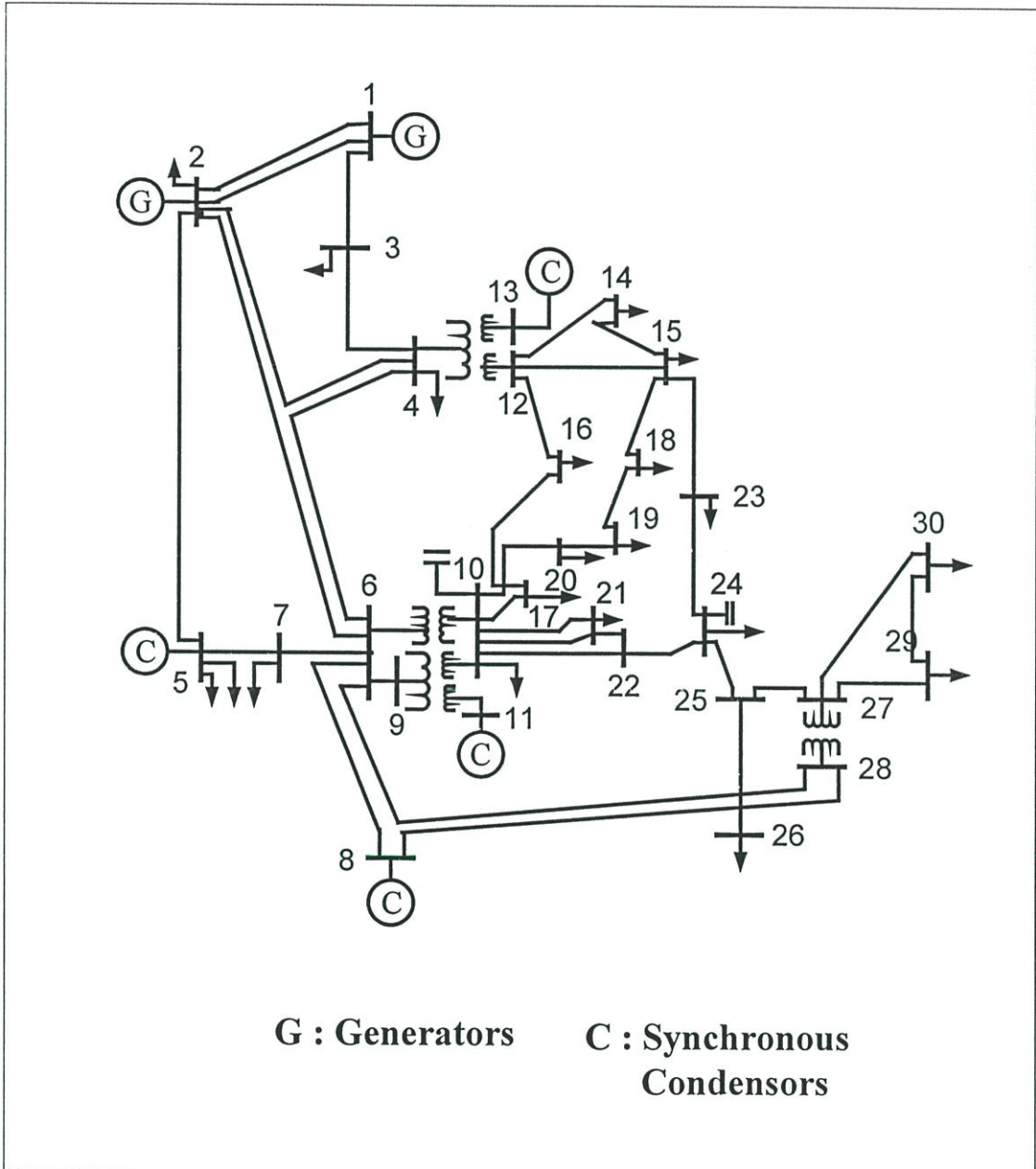
- [51] Thomas W. Gedra. 1999. "On Transmission Congestion and Pricing." **IEEE Trans. on Power Systems**. 14(1) : 241 – 248.
- [52] The MathWorks, Inc. **Using Matlab Version 5**. Massachusetts : The MathWork Incorporation.
- [53] PowerWorld Cooperation. 1999. **PowerWorld Simulator Version 6.0 User's Guide**. Illinois : PowerWorld Corporation.
- [54] University of Washington Electrical Engineering. "Power Systems Test Case Archives." [Online]. Available : <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>. 2000.

ภาคผนวก ก

รายละเอียดระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS

ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 Bus

รูปแบบการจัดวางโครงข่ายของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 Bus แสดงในรูปที่ ก.1 รายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับบัสแสดงในตารางที่ ก.1 ในขณะที่รายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับสายส่งไฟฟ้าแสดงในตารางที่ ก.2 ข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ ก.1-ก.2 อยู่ในรูปแบบ per unit โดยมี Base power เท่ากับ 100 MVA ส่วนรายละเอียดระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบอื่นของ IEEE สามารถค้นได้จาก [54]



รูปที่ ก.1 การจัดวางโครงข่ายของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 Bus [54]

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS

Nr.	Type	θ	V_{fix}	P_{Load}	Q_{Load}	P_{gen}	Q_{gen}	B_{shunt}	V_{base}
1	Slack	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
2	PV	0	1.0000	21.70	12.70	0.0000	0.0000	0.00	135
3	PQ	0	1.0000	2.40	1.20	0.0000	0.0000	0.00	135
4	PQ	0	1.0000	7.60	1.60	0.0000	0.0000	0.00	135
5	PQ	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
6	PQ	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
7	PQ	0	1.0000	22.80	10.90	0.0000	0.0000	0.00	135
8	PQ	0	1.0000	30.00	30.00	0.0000	0.0000	0.00	135
9	PQ	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
10	PQ	0	1.0000	5.80	2.00	0.0000	0.0000	0.19	135
11	PQ	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
12	PQ	0	1.0000	11.20	7.50	0.0000	0.0000	0.00	135
13	PV	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
14	PQ	0	1.0000	6.20	1.60	0.0000	0.0000	0.00	135
15	PQ	0	1.0000	8.20	2.50	0.0000	0.0000	0.00	135
16	PQ	0	1.0000	3.50	1.80	0.0000	0.0000	0.00	135
17	PQ	0	1.0000	9.00	5.80	0.0000	0.0000	0.00	135
18	PQ	0	1.0000	3.20	0.90	0.0000	0.0000	0.00	135
19	PQ	0	1.0000	9.50	3.40	0.0000	0.0000	0.00	135
20	PQ	0	1.0000	2.20	0.70	0.0000	0.0000	0.00	135
21	PQ	0	1.0000	17.50	11.20	0.0000	0.0000	0.00	135
22	PV	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
23	PV	0	1.0000	3.20	1.60	0.0000	0.0000	0.00	135
24	PQ	0	1.0000	8.70	6.70	0.0000	0.0000	0.04	135
25	PQ	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
26	PQ	0	1.0000	3.50	2.30	0.0000	0.0000	0.00	135
27	PV	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135
28	PQ	0	1.0000	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	135

Continued —→

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS (ต่อ)

Nr.	Type	θ	V_{fix}	P_{Load}	Q_{Load}	P_{gen}	Q_{gen}	B_{shunt}	V_{base}
29	PQ	0	1.0000	2.40	0.90	0.0000	0.0000	0.00	135
30	PQ	0	1.0000	14.90	5.00	0.0000	0.0000	0.00	135

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเส้นทางของสายส่งของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS

Nr.	Type	Bus1	Bus2	R	X	B	n_1/n_2
1	Line	1	2	0.0200	0.0600	0.0300	1
2	Line	1	3	0.0500	0.1900	0.0200	1
3	Line	2	4	0.0600	0.1700	0.0200	1
4	Line	3	4	0.0100	0.0400	0.0000	1
5	Line	2	5	0.0500	0.2000	0.0200	1
6	Line	2	6	0.0600	0.1800	0.0200	1
7	Line	4	6	0.0100	0.0400	0.0000	1
8	Line	5	7	0.0500	0.1200	0.0100	1
9	Line	6	7	0.0300	0.0800	0.0100	1
10	Line	6	8	0.0100	0.0400	0.0000	1
11	Line	6	9	0.0000	0.2100	0.0000	1
12	Line	6	10	0.0000	0.5600	0.0000	1
13	Line	9	11	0.0000	0.2100	0.0000	1
14	Line	9	10	0.0000	0.1100	0.0000	1
15	Line	4	12	0.0000	0.2600	0.0000	1
16	Line	12	13	0.0000	0.1400	0.0000	1
17	Line	12	14	0.1200	0.2600	0.0000	1
18	Line	12	15	0.0700	0.1300	0.0000	1
19	Line	12	16	0.0900	0.2000	0.0000	1
20	Line	14	15	0.2200	0.2000	0.0000	1
21	Line	16	17	0.0800	0.1900	0.0000	1
22	Line	15	18	0.1100	0.2200	0.0000	1

Continued →

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเส้นทางของสายส่งของระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 BUS (ต่อ)

Nr.	Type	Bus1	Bus2	R	X	B	n_1 / n_2
23	Line	18	19	0.0600	0.1300	0.0000	1
24	Line	19	20	0.0300	0.0700	0.0000	1
25	Line	10	20	0.0900	0.2100	0.0000	1
26	Line	10	17	0.0300	0.0800	0.0000	1
27	Line	10	21	0.0300	0.0700	0.0000	1
28	Line	10	22	0.0700	0.1500	0.0000	1
29	Line	21	22	0.0100	0.0200	0.0000	1
30	Line	15	23	0.1000	0.2000	0.0000	1
31	Line	22	24	0.1200	0.1800	0.0000	1
32	Line	23	24	0.1300	0.2700	0.0000	1
33	Line	24	25	0.1900	0.3300	0.0000	1
34	Line	25	26	0.2500	0.3800	0.0346	1
35	Line	25	27	0.1100	0.2100	0.0000	1
36	Line	28	27	0.0000	0.4000	0.0000	1
37	Line	27	29	0.2200	0.4200	0.0000	1
38	Line	27	30	0.3200	0.6000	0.0000	1
39	Line	29	30	0.2400	0.4500	0.0000	1
40	Line	8	28	0.0600	0.2000	0.0200	1
41	Line	6	28	0.0200	0.0600	0.0100	1

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- บทความที่ 1 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ใน วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 ธันวาคม 2543
ในชื่อเรื่อง
- การคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า
A Spot Pricing of Electricity in a Competitive Market.
- บทความที่ 2 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ใน วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กันยายน 2545
ในชื่อเรื่อง
- TCSC ในมุมมองของการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า
TCSC in the Aspect of Spot Prices Reduction.
- บทความที่ 3 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ใน วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 3 ธันวาคม 2545
ในชื่อเรื่อง
- เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point
สำหรับการคิดราคาตลาดของไฟฟ้า
Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Technique
for the Spot Pricing of Electricity.
- บทความที่ 4 ได้เข้าร่วมการประชุม 17th International Conference on Electricity Distribution
ณ Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona, Spain. 12-15 May 2003
ในชื่อเรื่อง
- TCSC as a tool to reduce the transmission congestion charge.



ปีที่ 17 ฉบับที่ 4

ธันวาคม 2543

1. วงจร บุตเตศวร ธิมอส อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้คาปาซิเตอร์และสร้างได้เต็มย่าน หวิษ ชูเมือง กอบชัย เตชภานุ วิษณุ กอพิชิตพันธ์	1
2. ตัวต้านทานลดยุคที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ที่มอส สิทธิพร เวชกรกิจ กอบชัย เตชภานุ	5
3. วงจรจุดและหารสัญญาณที่ใช้วงจรสะพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส วิจิตร เวชกรกิจ สิทธิพร เวชกรกิจ	11
4. การจัดการความกว้างของแบนด์ของ ATM สวิตช์โดยใช้ทฤษฎีแถวคอย ประพันธ์ ศรีจรูญ กอบชัย เตชภานุ อัครพล ศรีรัตน์ เทือชาย เมศรบุตร	17
5. อุปกรณ์ป้องกันการสั่นของพัดแบริโดยโรฮาร์ตไดโอดผ่านทรานสดิวเซอร์ ศศยาณี ทองษา นเรศ มาลัย สมศักดิ์ มิตตะตา ชุม กิมปาน กอบชัย เตชภานุ	23
6. การพัฒนาระบบแสดงผลจุดข้อมูลในโครงข่ายเคเบิลใยแก้วนำแสง รุ่ง พวงดอกไม้ม พินเชษฐ ม่วงนวล มนูญ สุทธเกษม อธิล พึ่งมา	29
7. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณแบบออคโตอริเดชันคู่กับวิธีการประมาณแบบอื่น ๆ สำหรับการเข้ารหัสเสียงพูดแบบอะแด็ปทีฟ ดิฟเฟอเรนเชียลโคเดอแมคโคเดอแมค	35
8. วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากผ่านใยแก้วนำแสง KU-Band ด้วยอุปกรณ์เวกเตอร์ที่มอส สุวิทย์ ใบบัว นเรศ เวชกรกิจ	41
9. การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม PID แบบปรับค่าอัตโนมัติ เสกธนา ธนะชัยวัฒน์ วิสูตร ศรีรัตนะ พิทยา ปานนิล ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ กิตติ ศีร์เศรษฐ	47
10. ระบบควบคุมค่าแอมป์และความเร็วแรง-บิดสำหรับมอเตอร์แบบสเตปย้อยด้วยวิธีการเก็บประจุรวม สภารท ทองนิจ ธนินฐา แซ่จิว	53
11. การวิเคราะห์การลดทอนของไฟฟ้าในรูปของไฟฟ้า สุนทร นัยนวัฒน์ วิชัย บรรจงจิตร นันทน์ กฤษณจินดา	56
12. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่จากการสูญเสียในการผลิตและการของระบบไฟฟ้ากำลัง ศุภชัย แซ่เจียน เอกราช พูลน้อย มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์	64
13. การหาจำนวนสล็อตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาโดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์โมเน็คส์ เจณินชาติ มานพ อรพณี สารภาค วิจิตร กิณเรศ	69
14. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนเคลื่อน ประภาภรณ์ ไพรสุวรรณา หุณศรี วรรณการ วรทัตย์ สิมเจริญ	75
15. การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลลัพธ์ค่าความถี่ของสัญญาณโดยอาศัยข้อมูลจาก IES File ทิพย์มา ติษสุธรรม วรทัตย์ สิมเจริญ นันทน์ กฤษณจินดา ศุภชัย บรรจงจิตร	81
16. การแก้ค่าตัวประกอบกำลังของวงจรเรโซแนนซ์ โสภณ สวัสดิ์วาริน ประภาภรณ์ ไพรสุวรรณา ชาย ชมภูอินทร์	86
17. ระบบป้องกันลัดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เชาวฤทธิ์ ธรรมเพ็ชร มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์ สมโภชน์ ประไพ	92
18. การออกแบบของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าโดยใช้คอมพิวเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 479 ศศิตา ศรีเวทย์ มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์	98
19. การออกแบบระบบแปลงพลังงานของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน วี พงษ์ศิริพานิช อธิล เมื่อนมกล ศุภชัย บรรจงจิตร นันทน์ กฤษณจินดา	104
20. การประเมินค่าความปลอดภัยในการออกแบบระบบกราวด์ จิรพงษ์ เมื่อกศัญญ์ สมชาติ จีวิวิภากร ศุภชัย บรรจงจิตร	110
21. ผลกระทบของสภาวะที่ทางเข้าต่อการผสมแบบปั่นเป่าในเตาเผาถลุงแร่ นันทน์ บาคะโยธินสุกุล จารุวัตร เจริญสุข	115
22. พฤติกรรมของการไหลของของแข็งเพลาจากลมด้วยสสารหล่อลื่นมอล-นิกโครเนียม โลจาดิเมท มณฑล มงคลวงศโรจน์ ศาวรัตน์ ปัญญากาญจน์	121
23. การเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์แก๊สโดยการใช้การดูดไอเสีย อัครเดช สิมมุกต์ สุนทร ละอองนวล	127
24. การวิเคราะห์ %wt. Coke Yield ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งในการผลิตน้ำมันที่มีคุณภาพสูงสุดในหน่วยเตาถลุงถ่านหิน อภิชัย พุทธเนียม ธีรชัย นาคพิพัฒน์	131

การคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า

A Spot Pricing of Electricity in a Competitive Market

สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ ศุภี บรรจงจิตร นันทน์ กฤษณจินดา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการผลิตกำลังไฟฟ้าในหลายประเทศได้มีการเปลี่ยนอย่างกว้างขวางจากเดิมที่อยู่ในรูปองค์กรผูกขาดของรัฐบาล ไปสู่ธุรกิจไฟฟ้าที่มีการแข่งขัน และการเปลี่ยนแปลงนี้กำลังเกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมผลิตกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย การคิดราคาไฟฟ้าที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในธุรกิจไฟฟ้า บทความฉบับนี้เสนอวิธีการคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า ซึ่งถูกพิจารณาเป็นปัญหาที่ขยายผลจากการทำออฟติมอลทราเวลเวอร์โฟลว (OPF) โดยที่โปรแกรมกำลังสองแบบต่อเนื่อง (SQP) ถูกนำมาใช้เป็นอัลกอริทึมในการคำนวณ ตัวคูณลากรางจ์ของสมการข้อจำกัดจะเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการคิดราคาตลาด ด้วยฟังก์ชันของความหมายทางเศรษฐศาสตร์ ผลลัพธ์จากระบบทดสอบ IEEE 30 Bus แสดงให้เห็นว่าการแอกทีฟของสมการข้อจำกัดมีผลต่อความแตกต่างของราคาตลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแอกทีฟของขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าและความสามารถของสายส่งจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ราคาตลาดมีความแตกต่างกัน

Abstract

There has been a widespread change in many countries' Electricity Supply Industries from a formerly state-owned monopoly to a competitive electricity market and these changes are now occurring in Thailand. Optimal electricity pricing is thus an important content in the competitive markets. This paper presents the spot pricing of electricity in a competitive electricity market as an extended Optimal Power Flow (OPF). A Sequential Quadratic Programming (SQP) is used as an algorithm for the calculation. Lagrange multipliers, associated with equality constraints in OPF, can play an important role in the spot pricing calculation. Numerical results on the IEEE 30 Bus test system show that the spot prices can be effected by the active inequality constraints, especially the active voltage limits and the active line limits can cause the spot prices to be highly different.

สัญลักษณ์

P_i	: ราคาลดลงของไฟฟ้า
C_i	: ต้นทุนทั้งหมดสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังลูกค้า
B_i	: ฟังก์ชันกำไรของลูกค้า
C_{in}	: ฟังก์ชันต้นทุนจากเชื้อเพลิงของโรงจักรไฟฟ้า
F	: ต้นทุนในการดำเนินการของระบบ
F_{SW}	: Social Welfare Function
F_{SC}	: Social Cost Function
γ_G	: Marginal Cost of Generation
γ_f	: Generation Marginal Fuel
γ_M	: Generation Marginal Maintenance
γ_{QS}	: Generation Quality of Supply
γ_R	: Generation Revenue Reconciliation
$\eta_{L,i}$: Network Marginal Losses
$\eta_{QS,i}$: Network Quality of Supply
$\eta_{R,i}$: Network Revenue Reconciliation
λ_s	: System Lambda
η_i	: Marginal Value of Network Operation
f_r	: Spinning Reserve Factor
λ, μ, α	: ตัวคูณลากรางจ์ของข้อก้ำหนดต่างๆ
a_i, b_i, c_i	: สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันต้นทุนจากเชื้อเพลิง
g_i	: สมการข้อก้ำหนดของการคำนวณ
h_i	: สมการข้อก้ำหนดของการคำนวณ
L	: ฟังก์ชันลากรางจ์สำหรับการคำนวณ
z	: ตัวแปรที่ประกอบด้วย x, λ และ μ
H	: เฮสเซียนเมทริกซ์ของ L ซึ่งเท่ากับ $\nabla^2 L$

สัญลักษณ์ที่มีตัวห้อย i หมายถึง บัสที่ i บนโครงข่ายของระบบส่ง ในบทความฉบับนี้ ถ้า Spinning reserve factor ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.1 โดยถือว่าความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ามีเพียงพอ ส่วนสัญลักษณ์ $\gamma_f, \gamma_M, \gamma_{QS}, \gamma_R, \lambda_s$ และ η_i เป็นค่าที่อ้างอิงของระบบรวมโดยถือว่าเท่ากับค่าที่บัสอ้างอิง (reference bus)

1. บทนำ

ปัจจุบัน ได้มีความเปลี่ยนแปลงมากมายในอุตสาหกรรมการผลิตกำลังไฟฟ้า โดยหน้าที่ในการผลิต การจัดส่ง และการจัดจำหน่ายกำลังไฟฟ้าถูกแยกออกจากกันและกระทำกับกำลังไฟฟ้าเหมือนกับสินค้าชนิดหนึ่ง และการเปลี่ยนแปลงนี้กำลังเกิดขึ้นในประเทศไทย บทความจำนวนมากถูกตีพิมพ์เผยแพร่ในเรื่องนี้ โดยศึกษาในการซื้อขายกำลังไฟฟ้าถูกอธิบายไว้ในบทความของ Mieleczarski และคณะ [1-2] ในขณะที่ส่วนประกอบของภาคการส่งกำลังไฟฟ้าได้ถูกอธิบายอย่างชัดเจนในบทความของ Rahimi [3] และการคิดราคาไฟฟ้าที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับธุรกิจไฟฟ้า บทความฉบับนี้เสนอการคิดราคาลดลงของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า [4] โปรแกรมกำลังสองแบบต่อเนื่อง (SQP) ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ [5] ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus [6] ถูกใช้เป็นกรณีศึกษา โดยที่ต้นทุนจากเชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณได้รับการอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2. ธุรกิจไฟฟ้า

2.1 ส่วนประกอบของธุรกิจไฟฟ้า

โดยการพิจารณาจากหน้าที่ในรูปที่ 1. ธุรกิจไฟฟ้าสามารถถูกจำแนกเป็น 9 ส่วนตามโครงสร้างคือ 1. บริษัทผู้ผลิตไฟฟ้า (G) 2. บริษัทจำหน่าย (PM) 3. ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (PX) 4. เจ้าของโครงข่ายระบบส่ง (TO) 5. ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (ISO) 6. ผู้ให้บริการเสริมเสถียรภาพ (AC) 7. ผู้ประสานงานจัดการการเดินเครื่อง (SC) 8. ผู้ให้บริการขายปลีกไฟฟ้า (R) 9. ผู้ให้บริการจำหน่ายไฟฟ้า (D) ซึ่งสำคัญคือเจ้าของโครงข่ายระบบส่งและศูนย์ควบคุมระบบอิสระ ต้องไม่มีส่วนในธุรกิจทั้งภาคการผลิตและการจำหน่าย ทั้งนี้เพื่อความยุติธรรมในการดำเนินการของระบบ [3]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของธุรกิจไฟฟ้าโดยจำแนกตามหน้าที่

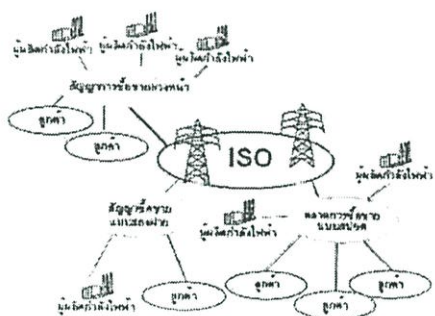
2.2 สัญญาการซื้อขายกำลังไฟฟ้าในระดับการผลิต

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ดำเนินการแบบธุรกิจ สัญญาการซื้อขายกำลังไฟฟ้าในระดับการผลิต มี 3 ประเภท [2] ดังนี้

สัญญาการซื้อขายแบบสองฝ่าย (Bilateral contracts) คือการตกลงซื้อขายกำลังไฟฟ้าที่ขนาด ราคา และเวลาที่แน่นอน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดความเสี่ยงในการประมูลในตลาดอื่นๆ

เงื่อนไขในการซื้อขายต้องอยู่ภายใต้ข้อบังคับของธุรกิจไฟฟ้า

สัญญาซื้อขายแบบล่วงหน้า (Forward contracts) คือการซื้อขายโดยผ่านกลไกการประมูลซึ่งอาจเป็นการประมูลแบบ Day-ahead หรือ Hour-ahead ขึ้นกับการออกแบบ กำลังไฟฟ้าที่ไม่ได้ซื้อขายใน 2 วิธีนี้ จะซื้อขายในตลาดไฟฟ้าแบบสปอตตลาดไฟฟ้าแบบสปอต (Spot market) คือตลาดที่ทำให้เกิดความสมดุลระหว่างความต้องการไฟฟ้า (อุปสงค์) และความสามารถในการผลิตไฟฟ้า (อุปทาน) ซึ่งเป็นการคำนวณระยะเวลาจริงและเป็นหน้าที่ของส่วนดำเนินการไฟฟ้าอิสระ



รูปที่ 2 สัญญาการซื้อขายกำลังไฟฟ้าในระดับการผลิต

3. ราคาตลาดของไฟฟ้า

3.1 นิยามของราคาตลาดของไฟฟ้า

ราคาตลาด (Spot price) ถูกนำมาใช้กับระบบกำลังไฟฟ้าเป็นครั้งแรกโดย F. C. Schweppe และคณะ [4] โดยกล่าวว่าราคาตลาดของไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal cost) ซึ่งพิจารณาจากต้นทุนทั้งหมดในการดำเนินการ โดยไม่คำนึงถึงการคืนทุน (Revenue reconciliation) ดังนี้

$$P_i = \frac{\partial C_T}{\partial P_{e_i}} \tag{1}$$

โดยต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

สมดุลของพลังงาน (Energy Balance) คือพลังงานไฟฟ้าต้องมีความสมดุลทั้งของระบบกำลังไฟฟ้าโดยรวมและที่แต่ละบัสบนโครงข่ายระบบส่ง

ขีดจำกัดในการผลิต (Generation Limit) คือความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดต้องไม่เกินขีดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าทั้งหมดในช่วงเวลานั้น

กฎของเกอ์ชอฟ (Kirchoff's Law) คือการไหลของพลังงานไฟฟ้าและความสูญเสียในโครงข่ายระบบส่ง ต้องเป็นไปตามกฎทางกายภาพของระบบกำลังไฟฟ้า (Power Flow)

ขีดจำกัดของระบบส่ง (Line Flow Limit) คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งในแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินพิกัดของเส้นทางนั้นๆ และต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการดำเนินการของระบบ

ในด้านการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าสูงสุดของ Social welfare function ซึ่งมีสมการดังนี้

$$F_{SW} = \sum_i (B_i - C_{P_{e_i}}) \tag{2}$$

ในความหมายเดียวกัน เราสามารถหาค่าต่ำสุดของ Social cost function ซึ่งมีความหมายตรงข้ามกับสมการที่ (2) และถูกใช้เป็นฟังก์ชันเป้าหมายในการคำนวณ โดยถือว่าเป็นต้นทุนในการดำเนินการของระบบกำลังไฟฟ้า ดังนี้

$$F = F_{sc} = \sum_i (C_{P_{e_i}} - B_i) \tag{3}$$

ฟังก์ชันกำไรของลูกค้า (B_i) (ซึ่งจำเป็นต้องทราบราคาไฟฟ้าที่บัสต่างๆ) จะไม่ถูกนำมาพิจารณาในสมการที่ 2 และ 3 เนื่องจากความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ไม่สามารถรู้ล่วงหน้าและราคาตลาดของไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ได้จากการคำนวณในขณะเวลาจริง (Real-time pricing)

3.2 องค์ประกอบของราคาตลาดของไฟฟ้า

ราคาตลาดของไฟฟ้าซึ่งเรียกเก็บจากลูกค้าที่บัส i บนโครงข่ายระบบส่ง คือผลรวมจากองค์ประกอบดังต่อไปนี้

$$P_i = \gamma_F + \gamma_M + \gamma_{QS} + \gamma_R + \eta_{L,i} + \eta_{QS,i} + \eta_{R,i} \quad (4)$$

จากนิยามในหัวข้อ 3.1 ทำให้องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณทั้งจากการผลิต (γ_R) และระบบส่ง ($\eta_{R,i}$) ไม่ถูกนำมาพิจารณา และองค์ประกอบของราคาคาดส่วนที่เหลือจากสมการที่ 4 สามารถจำแนกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

$$\lambda_S = \gamma_F + \gamma_M \quad (5)$$

$$\gamma_G = \lambda_S + \gamma_{QS} \quad (6)$$

$$\eta_i = \eta_{L,i} + \eta_{QS,i} \quad (7)$$

$$\rho_i = \gamma_G + \eta_i \quad (8)$$

เนื่องจากการคำนวณการในลักษณะธุรกิจ องค์ประกอบบางส่วนจะถูกตัดทิ้งเพื่อปล่อยให้เกิดการแข่งขัน ราคาคาดของไฟฟ้าจึงเหลือแค่ผลรวมจาก 3 ส่วน คือ 1. ต้นทุนส่วนเพิ่มในการผลิตของระบบ 2. ต้นทุนส่วนเพิ่มจากความสูญเสียในระบบส่ง และ 3. ราคาจากความคับคั่งในระบบส่ง

4. การคำนวณราคาคาดของไฟฟ้า

4.1 ปัญหาสำหรับการคำนวณ

ด้วยความหมายและข้อกำหนดจากนิยามที่ตั้งไว้ได้กล่าวในหัวข้อ 3.1 การคิดราคาคาดของไฟฟ้าถูกพิจารณาเป็นการแก้ปัญหาที่ขยายผลจากออปติมิซทาวเวอร์โพลว (OPF) ดังนี้

$$\text{Min}_x F(x)$$

$$\text{โดยที่ } \begin{aligned} g_i(x) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(x) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (9)$$

ฟังก์ชันลากรองจ์เงื่อนของปัญหาออปติมิซทาวเวอร์โพลวในสมการที่ (9) สามารถเขียนได้ดังนี้ดังต่อไปนี้

$$L(z) = F(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x) \quad (10)$$

โดยที่รายละเอียดของฟังก์ชันเป้าหมายและข้อกำหนดนี้ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ดังได้กล่าวในนิยามต้นทุนในการดำเนินการของระบบกำลังไฟฟ้าถูกใช้เป็นฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งเป็นผลรวมจากต้นทุนจากเชื้อเพลิงของแต่ละโรงจักรที่ยื่นประมุขเข้ามา แทนด้วยเงิน โฉงกำลังสอง ดังนี้

$$F(x) = \sum_i C_{P_{G_i}} \quad (11)$$

$$\text{โดยที่ } C_{P_{G_i}} = a_i + b_i P_{G_i} + c_i P_{G_i}^2 \quad (12)$$

สมการและอสมการข้อกำหนด (Equality and Inequality constraints) เป็นข้อกำหนดเพื่อให้ระบบกำลังไฟฟ้าดำเนินการอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย โดยมาจาก สมดุลของพลังงาน ชีตจำกัดในการผลิต ชีตจำกัดของระบบส่ง และกฎของเคอร์ชอฟ ดังได้กล่าวไว้ในนิยามราคาคาดในหัวข้อ 3.1

$$P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^{N_g} V_i V_j |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (13)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} - \sum_{j=1}^{N_g} V_i V_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (14)$$

$$P_{G_i}^{\text{min}} \leq P_{G_i} \leq (1 - f_i) P_{G_i}^{\text{max}} \quad (15)$$

$$Q_{G_i}^{\text{min}} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\text{max}} \quad (16)$$

$$V_i^{\text{min}} \leq V_i \leq V_i^{\text{max}} \quad (17)$$

$$P_y^{\text{min}} \leq P_y \leq P_y^{\text{max}} \quad (18)$$

4.2 โปรแกรมกำลังสองแบบต่อเนื่อง (SQP)

โปรแกรมกำลังสองแบบต่อเนื่อง [5] ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาในหัวข้อ 4.1 คำเริ่มต้นในการคำนวณ ได้จากการ Run Power Flow แล้วประมาณค่าฟังก์ชันเป้าหมายแบบกำลังสอง ข้อกำหนดต่าง ๆ ถูกประมาณค่าแบบเชิงเส้นอันดับที่ 1 แล้วหาผลเฉลยโดยใช้โปรแกรมกำลังสอง (QP) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\text{Min } F(x_k) + \nabla F(x_k) \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T \nabla^2 L(x_k) \Delta x$$

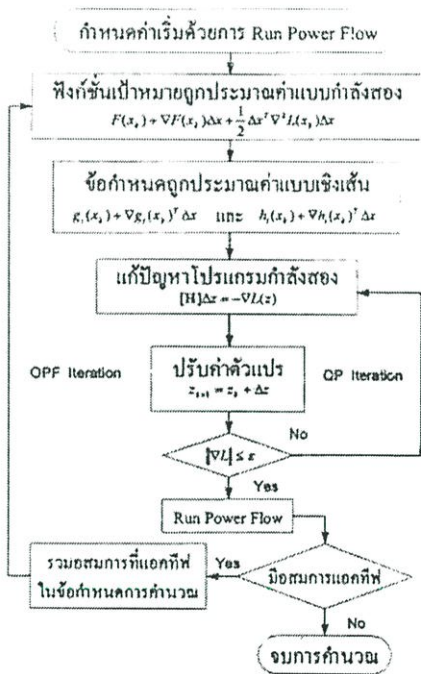
$$\text{โดยที่ } \begin{aligned} g_i(x_k) + \nabla g_i(x_k)^T \Delta x &= 0 \\ h_j(x_k) + \nabla h_j(x_k)^T \Delta x &\leq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

อสมการที่เกิดการแตกที่เฟ่านั้นที่จะถูกรวมในการคำนวณด้วยโปรแกรมกำลังสอง และเนื่องจากเงื่อนไขของ KKT สำหรับความออปติมิซอันดับที่ 1 แกรเดียนของฟังก์ชันลากรองจ์เงื่อน ($\nabla L(z)$) ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งสำหรับโปรแกรมกำลังสอง นั่นคือการแก้สมการที่ 20 เพื่อให้ได้ค่า Δx $\Delta \lambda$ และ $\Delta \mu$ ซึ่งจะนำไปใช้ในการปรับค่าของตัวแปร x λ และ μ ในสมการที่ 21 ต่อไป

$$\begin{bmatrix} \nabla_{xx}^2 L(z) & -\nabla A(x_k) \\ -\nabla A(x_k)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla_x L(z) \\ A(x_k) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ \alpha_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ \alpha_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta \alpha_k \end{bmatrix} \quad (21)$$

ทำซ้ำสมการที่ 20 และ 21 จนกว่า $\|\nabla_x L\|$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด (ϵ) จากนั้นตรวจสอบค่าที่ได้จากการคำนวณโดย Run Power Flow ถ้าเกิดการแอกทีฟของอสมการข้อกำหนด ให้เริ่มทำการคำนวณอีกครั้งโดยรวมอสมการนั้นด้วย จนกว่าจะไม่เกิดการแอกทีฟของอสมการใด



รูปที่ 3 โฟลวชาร์ตแสดงขั้นตอนในการคำนวณ

ตัวคูณลากรองจ์ของสมการข้อกำหนด (λ_i) มีบทบาทสำคัญอย่างมาก เนื่องจากได้ให้ความหมายทางเศรษฐศาสตร์เป็นราคาตลาดของไฟฟ้าที่บัส i ดังที่ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 3.2 ขั้นตอนทั้งหมดในการคำนวณถูกแสดงในรูปที่ 3

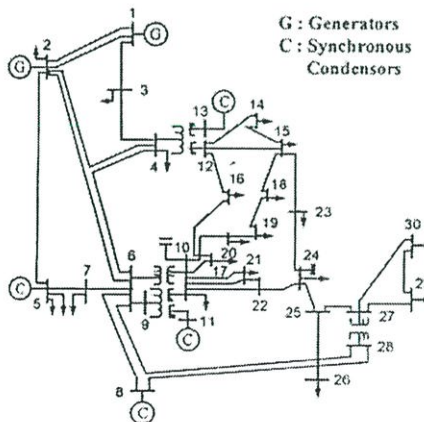
5. กรณีศึกษา

ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus ถูกใช้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ตลาดของไฟฟ้า บัส 1 ถูกกำหนดให้เป็นบัสอ้างอิง โดยที่ฟังก์ชันต้นทุนจากเชื้อเพลิงที่หน่วยผลิตกำลังไฟฟ้าทั้ง 6 แห่งขึ้นประมูลเข้ามาถูกแสดงในตารางที่ 1 และราคาตลาดของไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณแสดงในรูปที่ 5

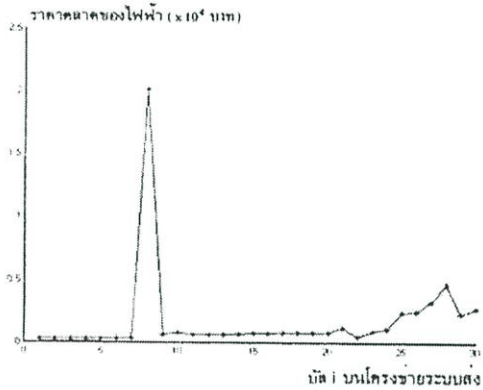
ตารางที่ 1 ข้อมูลฟังก์ชันต้นทุนจากเชื้อเพลิงในการผลิต

หน่วยผลิตที่บัส	สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันต้นทุนจากเชื้อเพลิง (Gcal / hr)		
	a_i	b_i	c_i
1	-0.002752	1.177074	0.002142
2	-0.003104	0.904104	0.003104
13	-0.000924	1.806506	0.000924
22	0.003104	1.024104	0.002910
23	0.244852	1.407278	0.000552
27	0.116468	0.091076	0.001826

* หน่วยการผลิตทุกแห่งเป็นโรงจักรไฟฟ้าประเภทกังหันก๊าซที่มีราคาเชื้อเพลิง 2 อัตราคือ 369 และ 372.381 Baht / Gcal



รูปที่ 4 ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus



รูปที่ 5 ราคาตลาดของไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

สำหรับการคำนวณ ค่าคงที่จำเพาะ (specific tolerance) ในการ Run Power Flow และ โปรแกรมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 1×10^{-8} และ 1×10^{-4} ตามลำดับ กระบวนการในการคำนวณเสร็จสิ้นโดยใช้เวลา 8.47 วินาที ด้วยค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่ากับ (ต้นทุนในการดำเนินการของระบบ) 119,769.86 บาท/ชั่วโมง จากกรณีศึกษาพบว่าการแยกตัวของอสมการข้อกำหนดของแรงดันที่บัส 7, 8 และ 29 ส่วนอสมการข้อกำหนดของการผลิตกำลังไฟฟ้าแยกตัวของโรงจักรไฟฟ้าเกิดการแยกที่บัส 1 และ 2 ในขณะที่อสมการข้อกำหนดของการผลิตกำลังไฟฟ้าที่โรงการแยกที่บัสที่บัส 13 และอสมการข้อกำหนดของความสามารถของสายส่งเกิดการแยกที่บัสที่บัส 6 - 8, 21 - 22 และ 22 - 24 โดยที่การแยกตัวของอสมการข้อกำหนดเหล่านี้มีผลต่อราคาตลาดของไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5

6. บทสรุป

บทความฉบับนี้ได้เสนอการคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้าโดยพิจารณาเป็นปัญหาที่ขยายผลจากออปติมิซชันหาเวอร์ฟลอร์ (OPF) โดยที่โปรแกรมกำลังสองแบบต่อเนื่อง (SQP) ได้ถูกนำมาใช้เป็นอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณด้วยพหุนามของความหมายทางเศรษฐศาสตร์ ตัวคุณลักษณะได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการคิดราคาตลาดของไฟฟ้า จาก

กรณีศึกษาพบว่า การแยกตัวของอสมการข้อกำหนดทั้ง 6 ประเภท (สมการที่ 13 - 18) ต่างมีผลทำให้ราคาตลาดของไฟฟ้า โดยสังเกตพบว่าการแยกตัวของอสมการข้อกำหนดของการผลิตกำลังไฟฟ้ามีผลต่อราคาตลาดน้อยมาก ในขณะที่การแยกตัวของอสมการข้อกำหนดของแรงดันไฟฟ้าและความสามารถของสายส่งมีผลต่อราคาตลาดอย่างมาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้ราคาตลาดของบัสที่เกิดการแยกที่บัสที่บัสที่อยู่ใกล้เคียงมีค่าต่างจากบัสอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจาก โครงการทุนบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ปี พ.ศ. 2542 และทางผู้แต่งขอขอบคุณ คุณวิมลแข วงษ์ละลิน ศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำหรับการคำนวณและคำแนะนำที่มีคุณค่า

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Mielczarski, "Introducing Open Electricity Market," Proc. of APSCOM-97, pp.451-456, Nov. 1997.
- [2] W. Mielczarski and G. Michalik, "Trading Electrical Energy in Open Electricity Market in Australia," Proc. of IEEE PES 1999 Winter Meeting, pp. 873-878, 1999.
- [3] F.A. Rahimi and A. Vojdani, "Meet the Emerging Transmission Segments," IEEE Computer Application in Power magazines, pp. 26-32, Jan. 1999.
- [4] F. C. Schweppe, M. C. Carananis, R. D. Tabors, and R. E. Bohn, Spot Pricing of Electricity, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1998.
- [5] S. G. Nash and A. Sofer, Linear and Nonlinear Programming, McGraw-Hill, Singapore, 1996.
- [6] H. Saadat, Power System Analysis, McGraw-Hill, Singapore, 1999.



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2545

1. การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าคิดเพี้ยนเนื่องจากภาวะไม่เบี่ยงเส้น ประเภทหรรณ เคลือบวินเนวรัตน์ ศุภี บรรจงจิตร บุญเลิศ สือเจย ปัญญา มาลีวัตร	1
2. การจำลองสภาพวัฏจักรโหลดเพื่อศึกษาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน สิริวิรัช ทัดสมาน ธวัชชัย ชรรณประสิทธิ์ วิจิตร กิณเรศ ศุภี บรรจงจิตร บุญเลิศ สือเจย	7
3. การเปรียบเทียบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเลื่อนเฟส FB-ZVS-PWM กับคอนเวอร์เตอร์แบบเลื่อนเฟส FB-ZVS-PWM ที่ใช้ ตัวเหนี่ยวนำอิมิตัว จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว วุฒิพันธ์ ศิลปวรรณวิวัฒน์ อนุวัฒน์ จงวนิชเลิศ	13
4. ชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อทดสอบสมรรถนะของพัดบิลลิเอมอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดำรงศักดิ์ ศรีวิเศษ วิจิตร กิณเรศ	19
5. การวิเคราะห์โหลดโพลา ตัวยวธิ์ฟาสต์ดีทีบีเอส โดยใช้เทคนิคสเปกเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อยแบบปรับปรุง พรสิณ ชัยศิริพงษ์ มณฑล สิลลาจินดาไกรฤกษ์	25
6. การวิเคราะห์อายุการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีผลกระทบจากแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ สุทัศน์ พิลา ศุภี บรรจงจิตร บุญเลิศ สือเจย ปัญญา มาลีวัตร	31
7. TCSC ในมุมมองของการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย ศุภี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา วิมลแข วงศ์ละสิณ	37
8. การศึกษาผลกระทบสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงด้านสมรรถนะของหัวเผาถ่านหินบรันเนอร์ จาวุวัตร เจริญสุข สนธยา มิเสียง	43
9. การเปรียบเทียบสมรรถนะของหัวเผาถ่านหินเพื่อการใช้งานไปใช้ประโยชน์ในครัวเรือน จาวุวัตร เจริญสุข สุรัชย์ จึงจตุพรชัย	49
10. โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาเวลาในการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ต่าเกิง ไคประเสริฐพงษ์ วรินทร์ วิโรจน์วรานุกัณฑ์ อรบุษ พันธุ์มีสี วันชัย สุทธิรัตน์	55
11. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กด้วยซีมอส อังคณา จารุวาระกุล กอบชัย เดชหาญ	61
12. วงจรบุดสแตป ไลน์มอส อินเวอร์เตอร์ ทำงาญแบบเต็มขั้วที่หักคาไฟเลี้ยง 1 โวลท์ คำมอญ คงสมบูรณ์ กอบชัย เดชหาญ เอกกมล นิลอาษา	65
13. การออกแบบวงจรบุดสแตป ไลน์มอส ทำงาญที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำ ศิริวัฒน์ สัมไพบุลย์ กอบชัย เดชหาญ ชัยวุฒิ อาริย์พัฒนกุล สุชาติ คุณทวีเทพ	70
14. วงจรบุดสแตปพีเอ็มเอสไดรอสเททท์เพอร์ความเร็วสูง ทวิช ชูเมือง กอบชัย เดชหาญ ทิศิษฎุ โรจน์ทองคำ สุชาติ คุณทวีเทพ	76
15. วงจรลออซิลเลเตอร์ที่ปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าย่านความถี่ 700MHz-1.2GHz ด้วยสายส่งไมโครสตริป ยงยุทธ พิมพ์จำปา สมยศ จุณณะปิยะ	81
16. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเสขแบบหลายแถบความถี่ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคสไปนทร์านซิสชันฟังก์ชัน หรววัฒน์ ชิวปรีชา กอบชัย เดชหาญ พิสิทธิ์ เสนิม่วงศ์ ณ อดุทธยา	87
17. การสร้างตัวกรองเชิงเสขแบบโบลคอด ชูสิทธิ์ ประดับเพชร วิชระพงศ์ กิณจิตร สุรพันธ์ ถิ่นมัน กอบชัย เดชหาญ	93
18. การกำจัดฮาร์โมนิกที่ไม่ต้องการของดีจิตอลคอมบิฟิเลเตอร์โดยไมเมนตักของราง हे็ดดุสติ ตั้งสมรพงษ์ ฟูศักดิ์ สีวสุวิทย์	99
19. การแบ่งส่วนภาพโดยทฤษฎีกราฟของการค้อแบบหลายความละเอียดที่ผ่านการรักษาขอบแบบปรับเรียบ พรพจน์ โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ ฟูศักดิ์ สีวสุวิทย์	105
20. การออกแบบระบบเชื่อมต่อข้อมูลแบบจุดต่อจุดผ่านเครือข่าย SDH ไพโรจน์ หาดอ้าน กอบชัย เดชหาญ	111
21. การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายไร้สายที่ใช้การมอดูเลตแบบ GMSK พิเชษฐ ร่วมสมัคร สุรพล บุญจันทร์ เกียรติกร วงศ์โรจน์ภรณ์ สุวิพล สีทธิชีวภาค	117

TCSC ในมุมมองของการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า

TCSC in the Aspect of the Spot Prices Reduction

สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ สุทธิ บรรจงจิตร นิตศรภ์ กฤษณจินดา วิมลแข วงศ์ละติง *
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 * กองเทคโนโลยีศูนย์ควบคุม ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

บทคัดย่อ

สำหรับกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขัน ความแตกต่างของราคาตลาดของไฟฟ้าบนสายส่งไฟฟ้าถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับบริเวณที่ใกล้เคียง เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าว การชดเชยสายส่งไฟฟ้าจึงเป็นแนวทางที่น่าพิจารณาอันหนึ่ง ในขณะที่ เทคโนโลยีของ Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของอุปกรณ์ Flexible AC Transmission System (FACTS) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในระบบกำลังไฟฟ้า บทความฉบับนี้เสนอแนวทางในการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความคับคั่งบนสายส่งไฟฟ้า สำหรับขั้นตอนของการคำนวณได้ใช้โปรแกรมเชิงเส้นโดยใช้เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) และได้ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาจากค่าความค้ำงกล่าว ซึ่งมีระบบทดสอบ IEEE 30 Bus เป็นกรณีศึกษา ตัวอย่างต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ควบคุมระบบกำลัง ไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของราคาตลาดสำหรับสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ในขณะที่ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าก็ลดลงด้วย

Abstract

In a competitive electricity market, the spot price differences across the line become an important thing for the neighboring area. To mitigate these problems, transmission line compensation should be taken into account. The emerging technology of a so-called Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), a member of Flexible AC Transmission System (FACTS), has played an important role in the power system. This paper shows how to reduce the spot price differences across the line, caused by the line congestion. Units of TCSC are installed based on those differences. The Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) enhanced Linear Programming is employed in the determination progress. The test system of IEEE 30 Bus are used as a case study, while the examples of cost functions are all provided by The Electric Power System Control Center, The Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). The numerical results show that the spot price differences across the TCSC-embedded lines are reduced, meanwhile the total generation cost is also decreased.

1. บทนำ

ราคาลาดของไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในกิจการไฟฟ้า เนื่องจากมีผลสะท้อนถึงภาวะทางเศรษฐศาสตร์ที่แท้จริงของการซื้อขายไฟฟ้า [1-2] โดยสามารถคำนวณได้จากการทำออปติมิซอลพาวเวอร์โพลว์ (OPF) [3] เทคนิคจึงนิยมมากถูกค้นคว้าเพื่อเพิ่มความสามารถในการหาผลเฉลยของ OPF และพบว่าโปรแกรมเชิงเส้นมีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาาระบบขนาดใหญ่ ส่วนเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) ช่วยเพิ่มความเร็วในการคำนวณได้เป็นอย่างมาก [4-5]

ด้วยความก้าวหน้าทางด้านของเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) เป็นอุปกรณ์ประเภทหนึ่งของ FACTS Devices [6] ที่ได้มีเข้ามามีบทบาทในระบบกำลังไฟฟ้าและแสดงความสามารถที่น่าสนใจหลายด้าน ดังที่ได้อธิบายในหนังสือและบทความวิชาการจำนวนมาก [7-10]

บทความฉบับนี้เสนอแนวทางหนึ่งสำหรับการปรับอัตราค่าลาดของไฟฟ้า โดยเลือกติดตั้งอุปกรณ์ TCSC บนสายส่งไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาจากค่าความแตกต่างของราคามบนสายส่งไฟฟ้า เทคนิค PCPDIP ได้นำมาใช้ในขั้นตอนของการคำนวณราคา ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 30 Bus [9] ได้ใช้เป็นกรณีศึกษา โดยตัวอย่างต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ใช้การคำนวณได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2. ราคาลาดของไฟฟ้า

2.1 คำจำกัดความ

Fred C. Scheweppe และคณะ [1] กล่าวว่าราคาลาด หมายถึง ต้นทุนในการส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังลูกค้าแต่ละราย สำหรับแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$P_i = \frac{\partial C_i}{\partial P_{di}} \quad (1)$$

โดยที่ P_i และ P_{di} คือ ราคาลาดและความต้องการไฟฟ้าแต่ละบัส, C_i คือ ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบ

2.2 การคิดราคาลาดของไฟฟ้า

ราคาลาดของไฟฟ้าสามารถหาได้จากผลเฉลยของปัญหาออปติมิซอลพาวเวอร์โพลว์ [2] ดังแสดงในสมการ (2)

$$\text{Min } F(x)$$

$$\text{โดย } g_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

สำหรับ OPF ขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมเชิงเส้นแตกต่างจากโปรแกรมกำลังสอง [2] เพียงแค่การประมาณค่าในลักษณะเชิงเส้นของฟังก์ชันเป้าหมายเท่านั้น

3. เทคนิค PCPDIP

3.1 Primal Problem และ Dual Problem

ปัญหา OPF หลังจากการประมาณแบบเชิงเส้นสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ในรูปแบบของ Primal และ Dual Problem ดังแสดงในสมการที่ (3-4) [5]

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & c^T x \\ \text{Subject to} \quad & Ax = b \\ & x + s = u \\ & x, s \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } c, x, s, u \in R^n, b \in R^m, A \in R^{m \times n}$$

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & b^T y - u^T w \\ \text{Subject to} \quad & A^T y + z - w = c \\ & z, w \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } z, w \in R^n, y \in R^m$$

ฟังก์ชันลากรองเขียนสำหรับการแก้ปัญหานี้แสดงในสมการที่ (5) ส่วนเงื่อนไขความออปติมิซอลอันดับที่ 1 ของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) แสดงในสมการที่ (6)

$$L(x, s, \mu) = c^T x - \mu \sum_{j=1}^n \ln x_j - \mu \sum_{j=1}^n s_j \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ x + s &= u \\ A^T y + z - w &= c \\ XZe &= \mu e \\ SWe &= \mu e \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่ X, S, Z, W คือ Diagonal Matrix ที่มีสมาชิกเป็น x_j, s_j, z_j, w_j ส่วน e คือเวกเตอร์ที่มีสมาชิกเป็น 1 ทั้งหมด และ μ คือ barrier parameter

3.2 การกำหนด Newton Direction

ทิศทางสำหรับการหาค่าเฉลยหาได้จากสมการที่ (7)

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta s \\ \Delta z \\ \Delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b - Ax \\ \mu - x - s \\ c - A'y - z + w \\ \mu e - XZe \\ \mu e - SWe \end{bmatrix} \quad (7)$$

ค่า $\Delta x, \Delta y, \Delta s, \Delta z, \Delta w$ จากสมการที่ (7) ได้นำไปใช้เพื่อการปรับค่าตัวแปร x, y, s, z, w ดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \alpha_0 \alpha_p \Delta x \\ y^{k+1} &= y^k + \alpha_0 \alpha_p \Delta y \\ z^{k+1} &= z^k + \alpha_0 \alpha_p \Delta z \\ w^{k+1} &= w^k + \alpha_0 \alpha_p \Delta w \end{aligned} \quad (8)$$

โดยที่ α_0 คือ Step reduction factor ส่วน α_p และ α_d คือ Maximum step size สำหรับ Primal และ Dual Problem

3.3 เทคนิค Predictor - Corrector

เพื่อลดระยะเวลาในการเข้าถึงจุดออกปดิมอด เทคนิคที่เรียกว่า Predictor - Corrector ได้นำมาใช้โดยแบ่งเวกเตอร์กำหนดทิศทาง Δ ออกเป็นสองส่วน ดังแสดงในสมการ (9)

$$\Delta = \Delta_A + \Delta_C \quad (9)$$

โดยที่ Δ_A คือ Predictor term ที่ทำหน้าที่ลดค่าความต่างระหว่าง Primal และ Dual Problem ส่วน Δ_C คือ Corrector term ทำหน้าที่ปรับผลเฉลยแต่ละรอบการคำนวณให้อยู่ในขอบเขตของข้อกำหนด

ค่า Δ_A หาได้จากผลเฉลยสมการ (7) โดยแทนค่า $\mu = 0$ ส่วน Δ_C คำนวณได้จากค่าการแทนค่าเวกเตอร์ $(0, 0, 0, \mu e - XZe, \mu e - SWe)^T$ ในด้านขวามือของสมการ (7) ดังแสดงในสมการ (10) และด้วย 60-90% ของเวลาในการคำนวณทั้งหมดถูกใช้ไปกับการแก้สมการของ KKT matrix จึงมีการนำเทคนิค Predictor - Corrector มาใช้และสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_C \\ \Delta y_C \\ \Delta s_C \\ \Delta z_C \\ \Delta w_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots 0, \dots \\ 0 \\ 0 \\ \mu e - \Delta X_A \Delta Z_A e \\ \mu e - \Delta S_A \Delta W_A e \end{bmatrix} \quad (10)$$

4. การปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า

4.1 ความต่างของราคาตลาดบนสายส่งไฟฟ้า

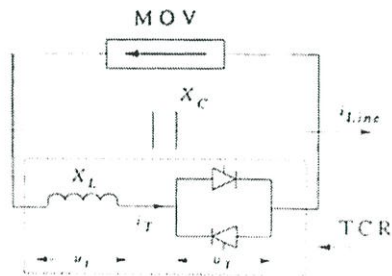
ความต่างของราคาตลาดคำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$\Delta \rho_k = \sum_{k=1}^{nl} \sum_{l=1}^{nb} N_{kl} \rho_l \quad (11)$$

โดยที่ ρ และ $\Delta \rho$ คือเวกเตอร์ของราคาตลาดและความต่างของราคาตลาด N คือ Network Incidence Matrix [1] ของระบบไฟฟ้า ส่วน nb, nl คือจำนวนบัสและจำนวนสายส่ง ค่า $\Delta \rho_k$ จะได้นำไปใช้ในการพิจารณาติดตั้ง TCSC ต่อไป

4.2 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

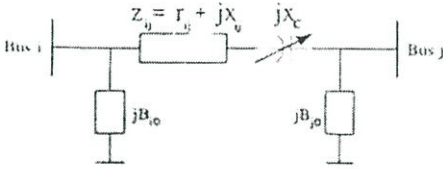
TCSC เป็นรูปแบบหนึ่งของ FACTS Device สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 รูปแบบ [10] ตามองศาของมุม firing ของ thyristor โดยรูปแบบ thyristor blocked มีมุม firing อยู่ที่ 180 องศา ส่วนรูปแบบ thyristor bypassed ที่ 90 องศา และรูปแบบ vernier control มีมุมระหว่าง 90-129 องศา สำหรับ Inductive region และ 142-180 องศา สำหรับ Capacitive region บทความฉบับนี้เลือกใช้การทำงานในรูปแบบ vernier control ในช่วง Capacitive region เท่านั้น ซึ่งสามารถให้ค่าอิมพีแดนซ์อยู่ระหว่าง $1.0X - 3.0X$ ทั้งนี้ TCSC มีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของ TCSC - Module

4.3 การติดตั้ง TCSC บนสายส่งไฟฟ้า

สายส่งไฟฟ้าแทนด้วยวงจรสมมูล z โดยที่ TCSC แทนด้วย capacitor หรือ reactor ที่มีอิมพีแดนซ์ jX_c [8] การติดตั้ง TCSC ทำให้สายส่งไฟฟ้าสามารถรับภาระได้ถึง พิกัดความร้อน [7] รูปแบบการติดตั้งแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลสายส่งไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง TCSC

ความต่างของค่า Susceptance ของสายส่งไฟฟ้า ก่อนและหลังจากการติดตั้ง TCSC แสดงในสมการที่ (12)

$$\Delta y_{ij} = y'_{ij} - y_{ij} = (g'_{ij} + jb'_{ij}) - (g_{ij} + jb_{ij}) \quad (12)$$

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

$$g'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_c)^2}}, b'_{ij} = -\frac{x_{ij} + x_c}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_c)^2}}$$

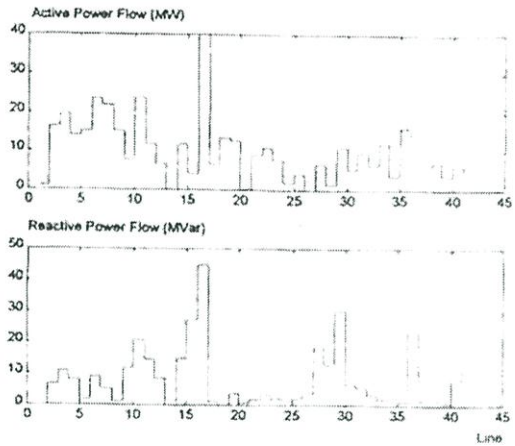
หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ลงบนสายส่งระหว่าง บัส i และ j ของระบบกำลังไฟฟ้า ต้องมีการปรับค่าของ System admittance matrix Y'_{bus} ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$Y'_{bus} = Y_{bus} + \begin{matrix} \begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y_{ij} & 0 & \dots & 0 & -\Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta y_{ij} & 0 & \dots & 0 & \Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \text{row-i} \\ \\ \\ \\ \\ \text{row-j} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{col-i} & & & & \text{col-j} \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix} \quad (13)$$

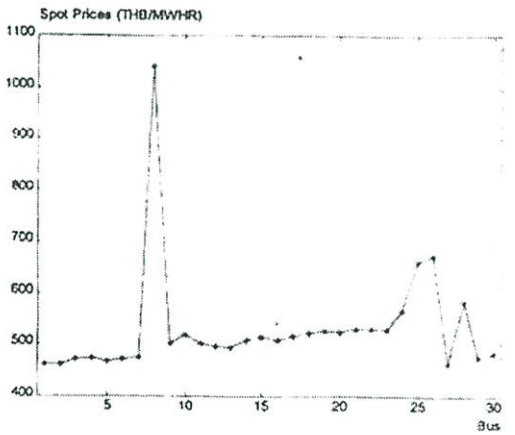
5. กรณีศึกษา

ระบบกำลังไฟฟ้ามาตรฐาน IEEE 30 Bus [9] ได้นำมาใช้เพื่อทดสอบหลักการที่นำเสนอ ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ควบคุมระบบกำลัง

ไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม้ว่าการชดเชยสายส่งไฟฟ้าสามารถทำได้ถึง 60 % ของค่า Reluctance ของสายส่งไฟฟ้า [8] แต่สำหรับบทความฉบับนี้เลือกปรับค่า X_c ของ TCSC ไว้ที่ 40 % บนทุกสายส่งที่มีการติดตั้ง สำหรับระบบทดสอบ Power Flow สำหรับทุกเส้นทางของสายส่งไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3 ในขณะที่ราคาตลาดของไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณแสดงในรูปที่ 4

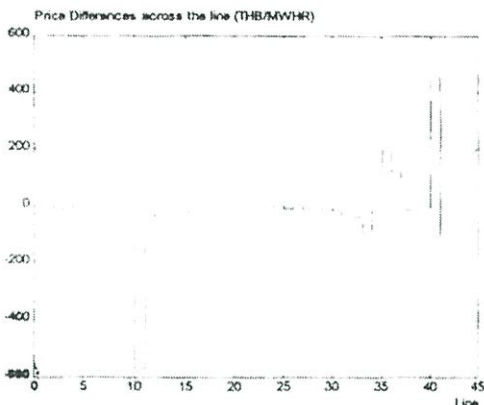


รูปที่ 3 ค่า Power Flow สำหรับระบบทดสอบ

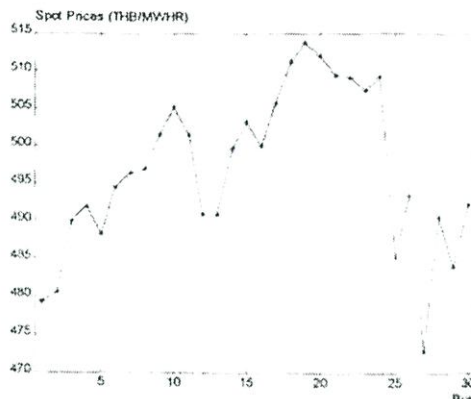


รูปที่ 4 ราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ

ค่าความต่างของราคาตลาดสำหรับทุกสายส่งไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการที่ (11) แสดงในรูปที่ 5 โดยค่านี้จะใช้สำหรับการพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์ TCSC เพื่อชดเชยสายส่งไฟฟ้าสำหรับการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าต่อไป

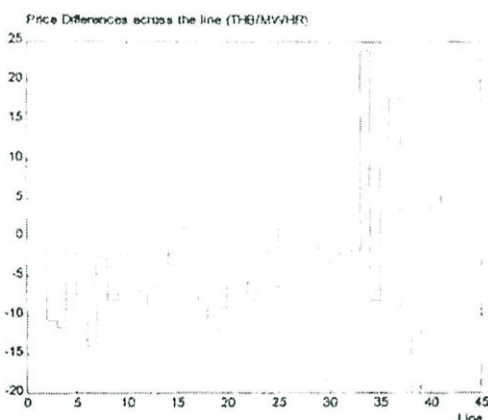


รูปที่ 5 ค่าความต่างของราคาตลาดสำหรับระบบทดสอบ

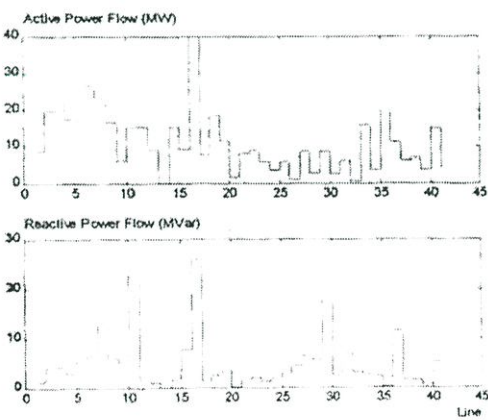


รูปที่ 7 ราคาตลาดของไฟฟ้าของระบบทดสอบ (ชุดเซต)

จากรูปที่ 4 ราคาตลาดของไฟฟ้ามีการปรับตัวขึ้นลงระหว่าง 461.41 – 1039.90 บาท/MWhr ดังแสดงในรูปที่ 4 มีเพียงบางบัสเท่านั้นที่ราคาสูงกว่าอย่างชัดเจน เช่นที่ราคา 1039.89 บาท/MWhr สำหรับบัสที่ 8 และที่ราคา 661.06 และ 672.09 บาท/MWhr สำหรับบัสที่ 25 และ 26 และถ้าพิจารณาจากรูปที่ 5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสายส่งไฟฟ้าเส้นทางที่ 10, 35 และ 40 มีค่าความต่างของราคามาก จึงได้อุปกรณ์ TCSC ติดตั้งเพื่อชดเชยสายส่งไฟฟ้าเส้นทางดังกล่าว โดย ค่า Power Flow ราคาตลาดและค่าความต่างของราคาตลาดสำหรับระบบทดสอบที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC แสดงในรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ค่าความต่างของราคาตลาดสำหรับระบบทดสอบ (ชุดเซต)



รูปที่ 6 ค่า Power Flow สำหรับระบบทดสอบ (ชุดเซต)

จากรูปที่ 7 พบว่าราคาตลาดของไฟฟ้าได้ลดลงมาอยู่ที่ระดับ 472.87 – 513.85 บาท/ MWhr ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ค่าความต่างของราคาตลาดลดลงมาอยู่ที่ระดับ 0 – 23.92 บาท/ MWhr จากแต่เดิม 0 – 567.25 บาท/ MWhr ดังแสดงในรูปที่ 8 ไม่เพียงแต่ราคาตลาดของไฟฟ้าที่ลดลงเท่านั้น สายส่งไฟฟ้าที่การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ก็มี Power Flow เพิ่มขึ้นถึง 56.93 % สำหรับสายส่งเส้นทางที่ 10 และเพิ่มขึ้น 26.64 % และ 139 % สำหรับสายส่งเส้นทางที่ 35 และ 40 ตามลำดับ โดยต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบลดลง 2 % จากเดิม 45258.79 บาท/ชั่วโมง

6. บทสรุป

บทความฉบับนี้ได้เสนอแนวทางหนึ่งในการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความคับคั่งบนสายส่งไฟฟ้า โดยมีเหตุผลหลักเพื่อลดความแตกต่างราคาตลาดสำหรับบริเวณที่ใกล้เคียงกัน โปรแกรมเชิงเส้นโดยใช้เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) ได้นำมาใช้สำหรับขั้นตอนของการคำนวณ และด้วยความสามารถที่โดดเด่น อุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) จึงถูกนำมาติดตั้งบนสายส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาจากค่าความต่างของราคา และเนื่องจากระบบทดสอบ IEEE 30 Bus จากการคำนวณได้ไว้ราคาตลาดแตกต่างกันมาก จึงเป็นระบบกำลังไฟฟ้าที่น่าสนใจ และได้เลือกใช้เป็นกรณีศึกษาในบทความฉบับนี้

จากผลการทดสอบพบว่า ราคาตลาดของไฟฟ้าปรับตัวลดลงจากเดิม 461.41 - 1039.90 บาท/MWhr มาอยู่ที่ระดับ 472.87 - 513.85 บาท/MWhr ค่าความต่างของราคาตลาดจากระดับ 0 - 567.25 บาท/MWhr มาอยู่ที่ 0 - 23.92 บาท/MWhr ในขณะที่ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบลดลง 2 % จากเดิม 45258.79 บาท/ชั่วโมง ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นอีกมุมมองของประโยชน์อันเกิดจากอุปกรณ์ TCSC และยิ่งกว่านั้น หากมีการควบคุมที่เหมาะสม อุปกรณ์ TCSC ยังสามารถแสดงความสามารถอื่นได้ ไม่ว่าจะเป็น การเพิ่ม Transient Stability การปรับลด Power Swings การควบคุม Power Flow และการลด Sub-synchronous Resonance

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการทุนบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และผู้เขียนขอขอบคุณคุณวิภา พงศ์วิสุทธิวัฒน์ และ คุณอนุภาค อากิตย์ วิศวกรกองควบคุมระบบและปฏิบัติการจ่ายไฟ ฝ่ายปฏิบัติการภาคกลาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สำหรับคำแนะนำและความอนุเคราะห์อันน่าประทับใจ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. C. Schweppe *et al.*, Spot Pricing of Electricity, KAP, Boston, 1978.
- [2] สุนทร ฝ่ายหมื่นไว้ว, สุทธิ บรรจงจิตร และ นันทน์ กฤษณจินดา, "การคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, ธันวาคม 2544 หน้า 58 - 63.
- [3] H. Glavitsch and R. Bacher, Optimal Power Flow Algorithms, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Zurich, 1998
- [4] J. A. Momoh *et al.*, "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods," IEEE Trans on Power Systems, Vol 14, No 1, February 1999, pp. 105-111.
- [5] X. Wang *et al.*, "Primal-Dual Interior Point Linear Programming Optimal Power Flow for Real-time Congestion Management," IEEE PES Winter Meeting, Vol. 3, January 2000, pp. 1643 -1649
- [6] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS, IEEE Press, New York, 1999
- [7] R. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [8] W. Fang and G. B. Shrestha, "Allocation of TCSC Devices to Optimize Total Transmission Capacity in a Competitive Power Market," IEEE PES Winter Meeting, Vol 2, 2001, pp 587-593.
- [9] A. Herbig, 2000, "On Load Flow Control in Electric Power Systems," Ph.D. Dissertation of Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- [10] T. Orfanogianni, 2000, "A Flexible Software Environment for Steady - State Power Flow Optimization with Series FACTS Devices," Ph.D. Dissertation of Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 19 ฉบับที่ 3

กันยายน 2545

1. การพัฒนาวิธีคิดเพื่อนำมาใช้กับน้ำมันที่ขนส่งสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลโดยการฉีดตรงเข้าห้องเผาไหม้
อภิชาติ เสมศรี จินดา เจริญพรพาณิชย์ 1
2. วิธีหนึ่งในการคำนวณเพื่อประหยัดพลังงานในการอบแห้งโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง
ธีรวิไล สุทธิสม มิ่ง โลกกิจแสงทอง 7
3. Effects of Central Inclusion on Copper Shaped-Wire Drawing by FEA
Somchai Nonasethasophon 13
4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่มีเดียนของสัญญาณไฟฟ้ากำลังเนื้อแชนกับมุมในการจอแผน
สาวิตรี สุวรรณรัตน์ ชุติศักดิ์ ลิ้มสกุล บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา อธิสา สุวัฒน์ประ 18
5. เปรียบเทียบการเสถียรของคานโดยใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ
ทรงพล บุญชูช่วย กอบชัย เตชหาญ สมยศ จุณณะปิยะ สุชาติ คุณทวีเทพ 24
6. เปรียบเทียบความแตกต่างของวัสดุเพื่อเตรียมเหล็กปฏิบัติงานแบบ Rail-to-Rail ใช้แหล่งจ่ายแรงดันต่ำ
มนตรี คำเงิน พงษ์ยศ อธิวัฒน์ กอบชัย เตชหาญ ชรรค์ชัย ตูลละสกุล 30
7. การศึกษาอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลาในสภาวะโหลดเกินปกติ
ทรงยศ ศรีประสาน สุทธิพร นันทพานิช สมโภชน์ ประไพ 36
8. การควบคุมเวกเตอร์แบบพีดีบีเอชเอ็มฟูลบริดจ์ของฟีดซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำอิมตัว
จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว เอกรงค์ จันทร์เจริญ อุบลวัฒน์ จวงวนิชเลิศ 42
9. เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point สำหรับการหาค่าค่าต่ำสุดของไฟฟ้า
สุนทร ฝ่ายหมื่นไวยุทธิ์ ศุภี บรรจงจิตร นิกิตน์ กฤษณจินดา วิมลนงษ์ วงศ์ละสิน 48
10. การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์ เทียบกับ วิธีไลเนียร์เซมิดีฟเฟอเรนเชียล
สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล มณฑล อธิวัฒน์ดาโรฤทธิ์ 54
11. การทดสอบและประเมินสมรรถนะของเครื่องแบบผสมแอกทีฟชานและเพสซีฟ 1 เฟส สำหรับภาระไม่เป็นเชิงเส้น
วิรัตน์ เกตุสวัสดิ์สมคร วิจิตร กิณเรศ 60
12. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบแอกทีฟเฟาเวอร์ฟีดเดอร์
ไพโรจน์ วนาอรุณ วิจิตร กิณเรศ 66
13. การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการควบคุมการทำงาน
จรัส ตั้งวงศ์ชูเกตุ เอกวิทย์ ชาติวงษ์ วิจิตร กิณเรศ 72
14. การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการควบคุมเวกเตอร์โดยง่ายด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เอ็มซีเอส 51
ปราโมทย์ พานุกุลลาภ วิทยา กิพย์สุวรรณพร วิจิตร กิณเรศ 78
15. การสร้างอัลกอริทึมของ Sobel Edge Detection ด้วย TMS320C31 โดยปราศจากไมโครคอนโทรลเลอร์
อนุชิต ตูบเหลือง สุรพันธ์ บิรมัน กอบชัย เตชหาญ 84

เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point สำหรับการคิดราคาตลาดของไฟฟ้า Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Technique For the Spot Pricing of Electricity

สุนทร ฝ่ายหมื่นไวยุทธิ์ สุทธิ บรรจงจิตร นันทิ์ กฤษณจินดา วิมลเชา วงศ์ละสัน *
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
* กองเทคโนโลยีศูนย์ควบคุม ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

บทคัดย่อ

ด้วยโครงสร้างราคาไฟฟ้าแบบใหม่ในกิจการไฟฟ้าที่มีการแข่งขันเสรี ราคาตลาดของไฟฟ้าเป็นส่วนที่สะท้อนถึงสถานะที่แท้จริงทางเศรษฐศาสตร์ของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าและจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการคิดราคาไฟฟ้า บทความฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการคิดราคาตลาดของไฟฟ้า ด้วยการนำเทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) เพื่อเพิ่มความสามารถของโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบของ IEEE เป็นกรณีศึกษาเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของวิธีการที่นำเสนอ ตัวอย่างต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วิธีการที่เสนอได้ถูกทดสอบโดยเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอมีความเหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่ โดยจำนวนรอบการคำนวณของวิธีได้แปรตามขนาดของระบบซึ่งทำให้สามารถหาผลเฉลยได้เร็วขึ้นในจำนวนรอบที่น้อยลง

Abstract

According to a new structure of electricity pricing in a competitive electricity market, spot prices can intrinsically reflect the economic status of the electricity market place. These can play an important role in electricity pricing. In this paper, the application of linear programming (LP) for the spot pricing is proposed, while the predictor-corrector primal-dual interior-point (PCPDIP) technique is used to enhance the ability of linear programming. Various systems of IEEE test cases are employed to present the ability of this method, while cost functions are all provided by The Electric Power System Control Center, The Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). The method, described above, has been validated using comparative simulation with other techniques. The result show that the technique proposed is suitable for large systems due to the system-sized independent iteration. The results, therefore, can be obtained faster with less iteration.

1. บทนำ

สำหรับกิจการไฟฟ้าในรูปแบบแข่งขัน การคิดราคาค่าไฟฟ้าได้เปลี่ยนแปลงไปสู่โครงสร้างใหม่ และราคาลาดของไฟฟ้าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการคิดราคาค่าไฟฟ้า [1] โดยที่การคิดราคาลาดอาจพิจารณาเป็นปัญหาที่ขยายผลจาก Optimal Power Flow (OPF) [2 - 5] ทั้งนี้ วิธีการแก้ปัญหาของ OPF ในหลายรูปแบบดังได้อธิบายในบทความของ James A. Momoh และคณะ [6] ซึ่งได้สรุปให้เห็นความสามารถของโปรแกรมเชิงเส้นและ Interior Point Technique เนื่องจากเวลาในการคำนวณกว่าร้อยละ 60 - 90 หมดไปกับการปัญหาหระบเชิงเส้นที่มาจากเงื่อนไขของ KKT [7-8] และเทคนิค Predictor - Corrector จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดรอบการคำนวณ และได้แสดงความสามารถเป็นอย่างดี ดังแสดงในบทความของ X Yan และคณะ [9]

บทความฉบับนี้เสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการคิดราคาลาดของไฟฟ้า โดยที่เทคนิค Predictor - Corrector Primal - Dual Interior Point (PCPDIP) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถของโปรแกรมเชิงเส้น ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบของ IEEE [10] ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา ซึ่งผลลัพธ์ถูกเปรียบเทียบกับโปรแกรมกำลังสองและโปรแกรมเชิงเส้นที่ใช้วิธีซิมเพล็กซ์ [11]

2. โครงสร้างการคิดราคาค่าไฟฟ้าแบบใหม่

ราคาลาดของไฟฟ้ากลายเป็นราคาบางที่ชี้ถึงสภาวะทางเศรษฐศาสตร์ในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า [1] โดยโครงสร้างใหม่ของการคิดราคาค่าไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 1. ราคาลาดของไฟฟ้า 2. ต้นทุนของระบบส่ง 3 ต้นทุนของระบบจำหน่าย 4. ต้นทุนการค้ำปลีก และ 5. Competition Transition Charge (CTC) โดยราคาลาดกำหนดจากกลไกตลาด ราคาส่วนที่ 2 - 4 ควบคุมโดยองค์กรกำกับดูแล ส่วนค่า CTC เป็นส่วนที่มาจากต้นทุนคิดล้างขององค์กรเดิมก่อนการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้า ทั้งนี้จะปรับตัวลดลงตามต้นทุนคิดล้างที่หักลบไป

3. ราคาลาดของไฟฟ้า

3.1 ค่าจำกัดความ

Fred C. Schweppe และคณะ [2] กล่าวว่าราคาลาดของไฟฟ้า หมายถึง ต้นทุนในการส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังลูกค้าแต่ละราย ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกันของระบบ สำหรับแต่ละช่วงเวลาที่มีพิจารณา ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\rho_t = \frac{\partial C_T}{\partial P_{th}} \tag{1}$$

โดยที่ ρ_t และ P_{th} คือ ราคาลาดและความต้องการไฟฟ้าแต่ละบัส ส่วน C_T คือ ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบ และต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

สมดุลของพลังงาน (Energy Balance) คือพลังงานไฟฟ้าต้องมีความสมดุลทั้งของระบบกำลังไฟฟ้าโดยรวมและที่แต่ละ บัสบนโครงข่ายระบบส่ง

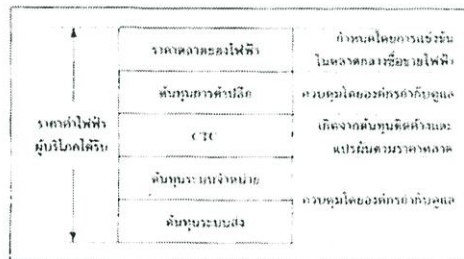
ขีดจำกัดในการผลิต (Generation Limit) คือความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดต้องไม่เกินขีดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงจักร ไฟฟ้าทั้งหมดในช่วงเวลานั้น

กฎของเคอร์ชอฟ (Kirchoff's Law) คือการไหลของพลังงานไฟฟ้าและความสูญเสียในโครงข่ายระบบส่ง ต้องเป็นไปตามกฎทางกายภาพของระบบกำลังไฟฟ้า

ขีดจำกัดของระบบส่ง (Line Flow Limit) คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งในแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินที่กีดของเส้นทางนั้นๆ และต้องไม่ก่อปัญหาในการดำเนินการของระบบ

3.2 การคิดราคาลาดของไฟฟ้า

ราคาลาดของไฟฟ้าสามารถหาได้ผลเฉลยของปัญหาที่ขยายผลจากการทำออปติมอลทาวเวอร์โพลาร์ [3] โดยมีสมการคณิตศาสตร์แสดงในสมการที่ (2)



รูปที่ 1 โครงสร้างใหม่สำหรับการคิดราคาค่าไฟฟ้า

$$\text{Min } F(x)$$

$$\text{โดย } g_i(x) = 0 \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$h_j(x) = 0 \quad , \quad j = 1, 2, \dots, n$$

โดยที่ฟังก์ชันเป้าหมาย $F(x)$ แสดงในสมการที่ (3) ในขณะที่ต้นทุนการผลิตแสดงในสมการที่ (4) ส่วนข้อกำหนดของกรทำ OPF แสดงในสมการที่ (5 - 10)

$$F(x) = \sum C_{P_n} \quad (3)$$

$$C_{P_n} = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (4)$$

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^{N_b} V_j V_j |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} = \sum_{j=1}^{N_b} V_j V_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$P_{Gi}^{\text{min}} \leq P_{Gi} \leq (1 - f_r) P_{Gi}^{\text{max}} \quad (7)$$

$$Q_{Gi}^{\text{min}} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\text{max}} \quad (8)$$

$$V_i^{\text{min}} \leq V_i \leq V_i^{\text{max}} \quad (9)$$

$$S_{ij}^{\text{min}} \leq S_{ij} \leq S_{ij}^{\text{max}} \quad (10)$$

โดยที่ f_r ในสมการที่ (7) คือค่า Spinning reserve factor

3.3 ฟังก์ชันลากรองเงเงินของปัญหา OPF และเงื่อนไข

การอุปติมอลของ Karush - Kuhn - Tucker

ฟังก์ชันลากรองเงเงินสำหรับการแก้ปัญหา OPF อันนี้สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (11)

$$L = f(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x) \quad (11)$$

สำหรับขั้นตอนการหาเฉลย เงื่อนไขการอุปติมอลอันดับที่ 1 ของ Karush - Kuhn - Tucker (KKT) ทั้งหมดแสดงในสมการที่ (12 - 16)

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (F(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x)) \Big|_{x^*} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(x) \Big|_{x^*} = 0 \quad (13)$$

$$\text{diag} \{ \mu \} \frac{\partial L}{\partial \mu} = \text{diag} \{ \mu \} h(x) \Big|_{x^*} = 0 \quad (14)$$

$$\mu \geq 0 \quad (15)$$

ฟังก์ชันเป้าหมายและข้อกำหนดจะถูกประมาณแบบเชิงเส้นตามจุด เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนของโปรแกรมเชิงเส้นต่อไป

4 เทคนิค PCPDIP

4.1 Primal Problem และ Dual Problem

ปัญหา OPF หลังจากการประมาณค่าแบบเชิงเส้นสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ในรูปของ Primal และ Dual Problem [9] ดังแสดงในสมการที่ (16 - 17)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & c^T x \\ \text{Subject to} \quad & Ax = b \\ & x + s = u \end{aligned} \quad (16)$$

$$x, s \geq 0$$

โดยที่ $c, x, s, u \in R^n, b \in R^m, A \in R^{m \times n}$

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & b^T y - u^T w \\ \text{Subject to} \quad & A^T y + z - w = c \\ & z, w \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

โดยที่ $z, w \in R^n, y \in R^m$

ฟังก์ชันลากรองเงเงินของการแก้ปัญหาด้วย PCPDIP แสดงในสมการที่ (18) ส่วนเงื่อนไขความอุปติมอลอันดับที่ 1 ของ KKT แสดงในสมการที่ (19)

$$L(x, s, \mu) = c^T x - \mu \sum_{i=1}^n \ln x_i - \mu \sum_{j=1}^n s_j \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ x + s &= u \\ A^T y + z - w &= c \\ XZe &= \mu e \\ SWe &= \mu e \end{aligned} \quad (19)$$

โดยที่ X, S, Z, W คือ Diagonal Matrix ที่มีสมาชิกเป็น x_j, s_j, z_j, w_j ส่วน e คือเวกเตอร์ที่มีสมาชิกเป็น 1 ทั้งหมด และ μ คือ barrier parameter

4.2 การกำหนด Newton Direction

ทิศทางสำหรับการหาผลเฉลยหาได้จากสมการที่ (20)

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & A^T & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta s \\ \Delta z \\ \Delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b - Ax \\ u - x - s \\ c - A^T y - z + w \\ \mu e - XZe \\ \mu e - SWe \end{bmatrix} \quad (20)$$

ค่า $\Delta x, \Delta y, \Delta s, \Delta z, \Delta w$ จากสมการที่ (20) ถูกนำไปใช้เพื่อการปรับค่าตัวแปร x, y, s, z, w ดังสมการที่ (21)

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \alpha_0 \alpha_p \Delta x \\ s^{k+1} &= s^k + \alpha_0 \alpha_r \Delta s \\ y^{k+1} &= y^k + \alpha_0 \alpha_y \Delta y \\ z^{k+1} &= z^k + \alpha_0 \alpha_z \Delta z \\ w^{k+1} &= w^k + \alpha_0 \alpha_w \Delta w \end{aligned} \tag{21}$$

โดยที่ α_0 คือ Step reduction factor ส่วน α_p และ α_r คือ Maximum step size สำหรับ Primal และ Dual Problem

4.3 เทคนิค Predictor - Corrector

เพื่อลดระยะเวลาและจำนวนรอบสำหรับการเข้าถึงจุดออปติ้มอล เทคนิคที่เรียกว่า Predictor - Corrector จึงถูกนำมาใช้โดยเวกเตอร์กำหนดทิศทาง Δ ในสมการที่ (21) ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ดังสมการที่ (22)

$$\Delta = \Delta_p + \Delta_c \tag{22}$$

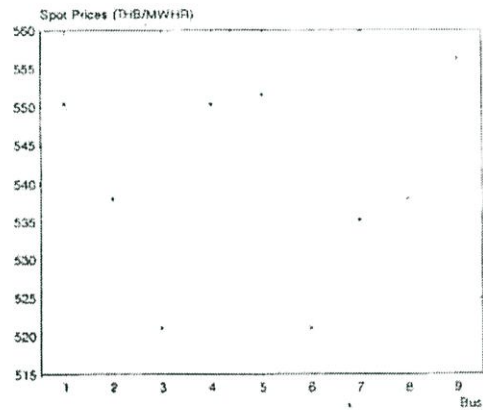
โดยที่ Δ_p คือ Affine-scaling component (หรือ Predictor term) ที่ทำหน้าที่ลดค่าความต่างระหว่าง Primal และ Dual Problem ส่วน Δ_c คือ Centering component (หรือ Corrector term) มีหน้าที่ในการปรับผลเฉลยแต่ละรอบการคำนวณให้อยู่ภายในข้อกำหนดของการคำนวณ

ค่า Δ_p หาได้จากผลเฉลยสมการ (23) โดยแทนค่า $\mu = 0$ และ Δ_c คำนวณได้จากการแทนค่าเวกเตอร์ $(0, 0, 0, \mu e - XZe, \mu e - SWe)^T$ ในด้านขวามือของสมการ (20) ดังแสดงในสมการ (23) และด้วย 60-90% ของเวลาในการคำนวณทั้งหมดถูกใช้ไปกับการแก้สมการของ KKT matrix เทคนิค Predictor - Corrector จึงถูกนำมาใช้และสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

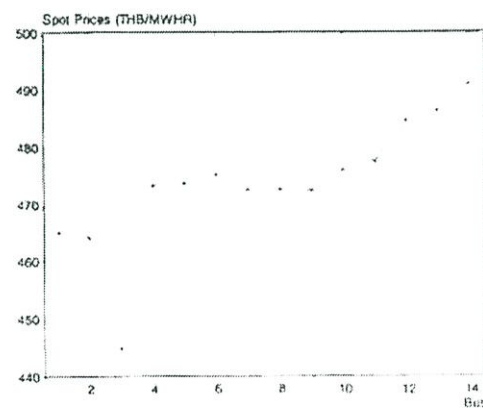
$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta s_p \\ \Delta z_p \\ \Delta w_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mu e - \lambda X Z_A \Delta x_p \\ \mu e - \lambda S W_A \Delta w_p \end{bmatrix} \tag{23}$$

5 ผลการทดลอง

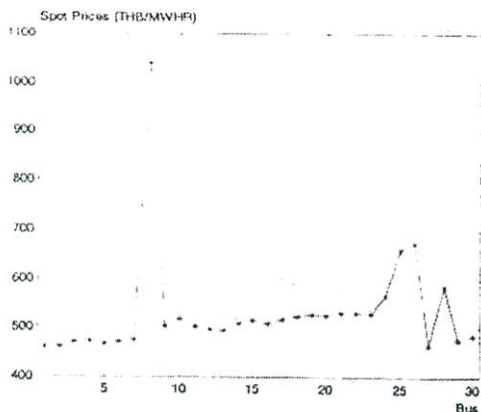
ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบของ IEEE ถูกนำมาใช้ในงานศึกษาเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของวิธีการที่นำเสนอ ไม่ว่าจะเป็น ระบบ 9, 14, 30, 57 และ 118 Bus [10] โดยตัวอย่างราคาค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าอ้างอิงจากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ราคาตลาดของไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณแสดงในรูปที่ 2 - 6 และเพื่อยืนยันวิธีการที่เสนอ จำนวนรอบและเวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณแสดงในรูปที่ 7 และตารางที่ 1 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมเชิงเส้นวิธี Simplex และโปรแกรมกำลังสองแบบต่อเนื่อง



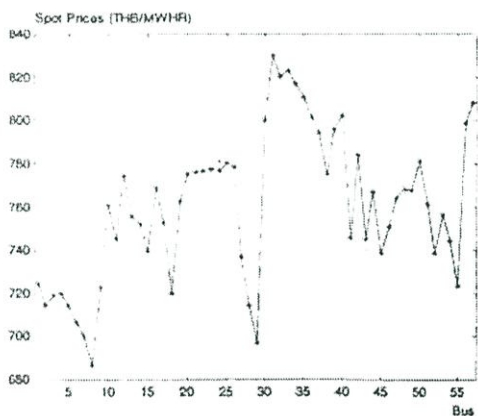
รูปที่ 2 ราคาตลาดของไฟฟ้า ระบบ IEEE 9 Bus



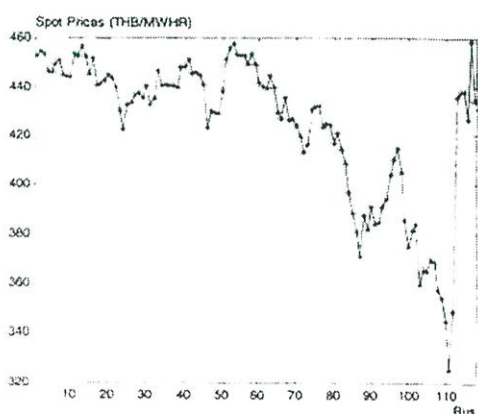
รูปที่ 3 ราคาตลาดของไฟฟ้า ระบบ IEEE 14 Bus



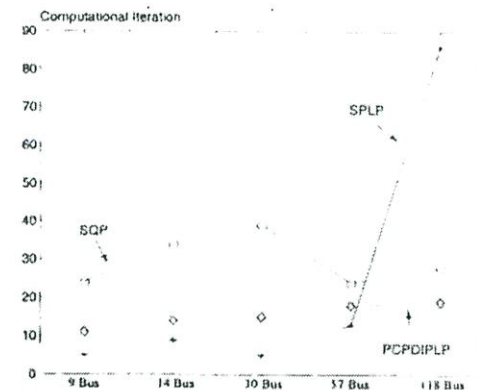
รูปที่ 4 ราคาตลาดของไฟฟ้า ระบบ IEEE 30 Bus



รูปที่ 5 ราคาตลาดของไฟฟ้า ระบบ IEEE 57 Bus



รูปที่ 6 ราคาตลาดของไฟฟ้า ระบบ IEEE 118 Bus



รูปที่ 7 จำนวนรอบการคำนวณราคาตลาดของไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้สำหรับการคำนวณ

ระบบทดสอบ	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)		
	SQP	SPLP	PCPDIPLP
9 Bus	1.38	2.12	4.15
14 Bus	4.19	6.50	16.89
30 Bus	12.37	21.47	33.62
57 Bus	27.63	40.20	27.23
118 Bus	1,760.71	1,693.56	168.75

* หมายเหตุ

SQP: Successive Quadratic Programming

SPLP: Linear Programming with Simplex Technique

PCPDIPLP: Linear Programming with the technique of Predictor - Corrector Primal - Dual Interior Point

รูปที่ 2 - 6 แสดงราคาตลาดของไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณสำหรับระบบทดสอบในแต่ละกรณี และแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณของ PCPDIPLP สำหรับระบบทดสอบขนาดเล็กจะไม่ได้แสดงความสามารถที่เด่นกว่าวิธีอื่นมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 1 แต่ถ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 57 และ 118 บัส ผลลัพธ์ที่ได้ถือว่าน่าสนใจ โดยที่รอบของการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การคำนวณของ PCPDIPLP มีได้เปรียบกับขนาดของระบบ และเวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณน้อยกว่า SQP และ SPLP มาก

6. สรุป

บทความฉบับนี้เสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการวิเคราะห์ราคาตลาดของไฟฟ้า เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point (PCPDIP) ถูกนำมาใช้เพื่อความสามารถของโปรแกรมเชิงเส้น ระบบกำลังไฟฟ้าทดสอบของ IEEE 9, 14, 30, 57 และ 118 Bus ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของวิธีการที่มีเสนอ โดยตัวอย่างต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าอ้างอิงจากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วิธีการที่เสนอได้ถูกทดสอบโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมเชิงเส้นที่ใช้เทคนิค Simplex (SPLP) และ โปรแกรมกำลังสอง (SQP)

ง ผลการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากจำนวนรอบการคำนวณพบว่า สำหรับระบบทดสอบ IEEE 9,14, 30 และ 57 Bus เทคนิค PCPDIP ให้ผลที่ดีกว่า SPLP แต่ดีกว่า SQP และสำหรับระบบทดสอบ IEEE 118 Bus เทคนิค PCPDIP ให้ผลน่าพอใจที่สุด โดยใช้เพียง 19 รอบ จะเห็นว่ามิได้แปรผันตามขนาดของระบบ ส่วน SPLP ใช้มากถึง 86 รอบ ซึ่งถือเป็นการแปรตามขนาดของระบบอย่างชัดเจนมาก และหากพิจารณาจากเวลาสำหรับการคำนวณ เทคนิค PCPDIP ได้ดีกว่า SQP และ SPLP สำหรับระบบทดสอบขนาดเล็ก แต่เร็วกว่าวิธี SQP และ SPLP อย่างมาก สำหรับระบบขนาดทดสอบใหญ่ ดังจะเห็นจากผลลัพธ์ของระบบทดสอบ IEEE 57 และ 118 Bus ทั้งนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า เทคนิค PCPDIP มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาของระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการทุนวิจัยกักภายในประเทศ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณวิทยา พงษ์วิสุทธิวัฒน์ และ คุณบุญนาถ ฉัตรชัย วิศวกร กองควบคุมระบบและปฏิบัติการจ่ายไฟฟ้าปฏิบัติการภาคกลาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สำหรับความอนุเคราะห์อันนำประทับใจ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, รายงานความก้าวหน้าการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้า และการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า, กรุงเทพฯ ฯ, 2543.
- [2] F. C. Schweppe *et al.*, *Spot Pricing of Electricity*, KAP, Boston, 1998.
- [3] ตูมทอ ฝ่ายหมื่นไวย, สุณี บรรจงจิตร และ นิตินันท์ กฤษณจินดา, "การวิเคราะห์ราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า," *วิศวกรรมภาคกระบัง*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, ธันวาคม 2543, หน้า 58 - 63
- [4] W. W. Hogan, *A Competitive Market Model*, Harvard University, Cambridge, 1993.
- [5] H. Glavitsch and R. Bacher, *Optimal Power Flow Algorithms*, ETH-Zurich, Zurich, 1998.
- [6] J. A. Momoh *et al.*, "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods," *IEEE Trans. Power System*, Vol.14, Feb. 1999, pp. 105-111.
- [7] A. Vannelli, "Teaching Large-Scale Optimization by an Interior Point Approach," *IEEE Trans. Education*, Vol. 36, No. 1, Feb. 1993, pp. 204-209.
- [8] G. Astfalk, I. Lustig, R. Marsten and D. Shanno, "The interior-point method for linear programming," *IEEE Software*, Vol. 9, No.4, July 1992, pp. 61 -68.
- [9] X. Wang *et al.*, "Primal-Dual Interior Point Linear Programming Optimal Power Flow for Real-time Congestion Management," *Proc. IEEE PES Winter Meeting*, Vol. 3, January 2000, pp. 1643 -1649
- [10] University of Washington Electrical Engineering, Power Systems Test Case Archives. <<http://www.ee.washington.edu/research/psca/>>
- [11] S. G. Nash and A. Sofer, *Linear and Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, Singapore, 1996

CIRED 2003

17th INTERNATIONAL CONFERENCE ON
ELECTRICITY DISTRIBUTION

17^{ème} CONGRÈS INTERNATIONAL DES
RÉSEAUX ÉLECTRIQUES DE DISTRIBUTION



BARCELONA 12>15 MAY/MAI 2003

CATALONIA PALACE OF CONGRESSES

PALAIS DES CONGRÈS DE CATALOGNE

- > Europe's leading international conference and exhibition on
Power Distribution Engineering
- > La plus importante conférence internationale avec exposition organisée en
Europe dans le domaine de la distribution d'énergie électrique



www.cired2003.be

TCSC AS A TOOL TO REDUCE THE TRANSMISSION CONGESTION CHARGE

Sunthorn FAIMUENWAI Somchart JIRIWIPAKORN Sulee BUNJOGNJIT Nithad KRISNACHINDA
Electrical Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) - Thailand
Kfsoonto@kmitl.ac.th

INTRODUCTION

Advanced Series Compensator has many benefits for power transmission with an emerging benefit being an adjustable power stability limit for an ac transmission system. The Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) is a device capable of such operation. Numerous studies have been conducted on the different aspects of this device such as transient stability, inter-area power swing and mitigation of subsynchronous resonance, meanwhile other aspect of the application is of importance.

The aim of this paper is to show that TCSC can be employed as a tool to reduce the transmission congestion charge, whilst the technique of predictor-corrector primal-dual interior point enhanced linear programming is used for the fast convergence of the computation. The numerical results on IEEE test systems have verified the method we presented. The dramatic decrease in the congestion charges can be obtained on the TCSC-embedded lines and the slight reduction in total generation cost and system loss are also achieved.

The paper begins with a concise review of the incremental cost based transmission pricing, while the Optimal Power Flow (OPF) and the technique of predictor-corrector primal-dual interior point (PCPDIP) enhanced linear programming and the transmission congestion charge are then described. The modeling of TCSC incorporating with the transmission line is also presented. Finally the numerical results are reported. The reactive power transaction charge is not included in the course of this study.

LOCATIONAL MARGINAL PRICE

The locational marginal price has been first introduced in electric power system in 1978 by F. C. Schweppe *et al* (1) before it becomes widely used in electricity pricing. This price can be interpreted as the cost of providing electric energy to customer as shown in the expression below.

$$\rho_i = \frac{\partial C_T}{\partial P_{di}} \quad (1)$$

where ρ_i, P_{di} : Marginal price and power demand at bus i
 C_T : Total generation cost of the power system

The derivative of eq.(1) has to be evaluated subject to constraints as shown in (1). These prices can be obtained from the problem of extended OPF and used for short-run marginal cost based and transmission pricing (2-3).

OPTIMAL POWER FLOW

The optimal power flow is a valuable tool for minimizing the cost of operating an electric power system. Dual variables or Lagrange multipliers associated with power balance equation provide the economic interpretation denoting the marginal prices. A great variety of solution methods has been investigated for the OPF problem such as Newton method, quadratic programming, linear programming and etc. The mathematics expression of OPF can be written as in eq.(2).

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && F(x) \\ & \text{subject to} && g_i(x) = 0 \quad , i = 1, 2, \dots, m \\ & && h_j(x) \leq 0 \quad , j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

where $F(x)$: Objective function
 $g_i(x)$: Equality constraints
 $h_j(x)$: Inequality constraints

The OPF problem in eq.(2) can be solved by successive linearizations of the nonlinear objective and constraint equations around an operating point defined a power flow solution. Linear programming is one of the appropriate tools to solve the large-scale problem of OPF.

PCPDIP ENHANCED LINEAR PROGRAMMING

LINEAR PROGRAMMING BASED OPF

The successive linearization of OPF problem has to be done before the progress goes on into the deeper steps. Simplex or any other method can be used and steps of LP-based OPF with PCPDIP is summarized in the following (3):

STEP 1 : Obtain initial power flow solution;

STEP 2 : Formulate linear programming subproblem using the most recent power flow solution to linearize (2);

STEP 3 : Solve the linear programming subproblem for the adjustments to OPF variables;

STEP 4 : Update variables to define new system state;

STEP 5 : If the system state meets the termination criteria, stop, otherwise go back to STEP 1 for the next iteration;

In STEP 5 the termination criteria derive from the 1st order optimality condition of Karush-Kuhn-Tucker (KKT), while more details about KKT will be discussed in the next section.

PREDICTOR-CORRECTOR PRIMAL-DUAL INTERIOR POINT ALGORITHM

Due to the fast convergence and the system-size independent iterations which provides the suitability for the large-scale problem (5-6), the technique of predictor-corrector primal-dual interior point enhanced linear programming is thus interested to solve the OPF problem in this paper.

To form the primal problem for linear programming, the linearized OPF problem can also be rewritten as:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & c^T x \\ \text{Subject to} \quad & Ax = b \\ & x + s = u \\ & x, s \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

where $c, x, s, u \in R^n, b \in R^m, A \in R^{m \times n}$. The dual problem is:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & b^T y - u^T w \\ \text{Subject to} \quad & A^T y + z - w = c \\ & z, w \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

where $z, w \in R^m, y \in R^m$

LaGrangian function of the linearized OPF problem is shown in eq.(5) where the nonnegativity of constraints in the primal problem with logarithm barrier penalty are added.

$$L(x, s, \mu) = c^T x - \mu \sum_{j=1}^n \ln x_j - \mu \sum_{j=1}^n s_j \quad (5)$$

The KKT's 1st order optimality condition for eq.(5) and the Newton direction are expressed in eq.(6-7) respectively.

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ x + s &= u \\ A^T y + z - w &= c \\ XZe &= \mu e \\ SWe &= \mu e \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & A^T & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta z \\ \Delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b - Ax \\ u - x - s \\ c - A^T y - z + w \\ \mu e - XZe \\ \mu e - SWe \end{bmatrix} \quad (7)$$

where X, S, Z, W are diagonal matrices with the elements x_j, s_j, z_j, w_j respectively, e is the n-vector of all ones, and μ is a barrier parameter.

The maximum step size (α_P and α_D), which is the factor maintaining the nonnegativity of variables of primal and dual

spaces, are found once the solutions ($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta z, \Delta w$) of eq.(7) has been calculated. The variables are updated by:

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \alpha_0 \alpha_P \Delta x \\ s^{k+1} &= s^k + \alpha_0 \alpha_P \Delta s \\ y^{k+1} &= y^k + \alpha_0 \alpha_D \Delta y \\ z^{k+1} &= z^k + \alpha_0 \alpha_D \Delta z \\ w^{k+1} &= w^k + \alpha_0 \alpha_D \Delta w \end{aligned} \quad (8)$$

where α_0 is the step-reduction factor, α_P and α_D are the maximum step size of primal and dual problem.

At this step, the predictor-corrector technique is employed to reduce the time of convergence focused on solving the linear system in eq.(7). The Newton direction vector is thus separated into two parts as shown in eq.(9).

$$\Delta = \Delta_A + \Delta_C \quad (9)$$

where Δ_A is the affine-scaling component or the predictor term. Its main function is to reduce the primal and dual infeasibilities and duality gap. Δ_C is the centering component or the corrector term. The main function is to keep the current iteration away from the boundary of feasible region.

Δ_A is the solution of eq.(7) with $\mu = 0$, and Δ_C is obtained by solving eq.(7) with the right-hand side replaced by $(0, 0, 0, \mu e - XZe, \mu e - SWe)^T$ as shown in eq.(10).

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & A^T & 0 & I & -I \\ Z & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_C \\ \Delta y_C \\ \Delta z_C \\ \Delta z_C \\ \Delta w_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mu e - \Delta X_A \Delta Z_A e \\ \mu e - \Delta S_A \Delta W_A e \end{bmatrix} \quad (10)$$

The Newton direction is finally determined. The same linear systems with two different right-hand side need to be solved and take much less computational time with the system-size independent iterations compared to the simplex method.

TRANSMISSION CONGESTION CHARGE

As discussed in the paper of Thomas W. Gedra (4), the difference of nodal spot price (locational marginal price) can be interpreted as the transmission congestion charge. The lines' congestion charge can be expressed as in eq.(11).

$$\Delta \rho_k = \sum_{k=1}^{nl} \sum_{l=1}^{nb} N_{kl} \rho_l \quad (11)$$

where $\rho, \Delta \rho$: Vectors of spot price and their differences.
N: Network incidence matrix (1).

THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR

As shown in Figure 1, TCSC module consists of a thyristor-controlled reactor (TCR), a fixed series capacitor and metal-oxide varistor, which is connected parallel for over voltage protection. The TCR is a static var controller that by means of a power electronic interface provides fast control over the reactive power. By means of the firing angle of the thyristors, TCSC can operate in three different modes comprising bypassed mode, blocked mode and vernier control mode. In this paper TCSC, used as a tool to reduce the transmission congestion charge, is modeled as a capacitor with the maximum compensation limited at 60 % (9) of the line reactance where it is embedded. That means the thyristors operate with the vernier control mode in the capacitive region.

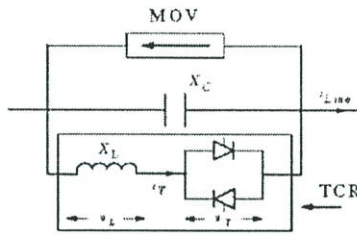


Figure 1. Component of TCSC-Module

For this study lumped π model is used to represent the transmission line with capacitor/reactor with impedance jX_C . Model of the TCSC-embedded line is shown in figure 2

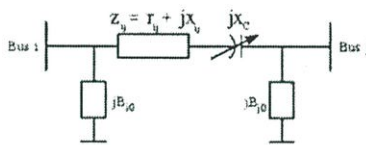


Figure 2. Lumped π model of transmission line

The line susceptance before and after the addition of TCSC can be expressed as :

$$\Delta y_{ij} = y'_{ij} - y_{ij} = (g'_{ij} + jb'_{ij}) - (g_{ij} + jb_{ij}) \quad (12)$$

where

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}}, b_{ij} = -\frac{x_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}}$$

$$g'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_C)^2}}, b'_{ij} = -\frac{x_{ij} + x_C}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_C)^2}}$$

The new system admittance matrix Y'_{bus} after adding TCSC on the line between bus i and bus j can be updated as :

$$Y'_{bus} = Y_{bus} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y_{ij} & 0 & 0 & -\Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta y_{ij} & 0 & 0 & \Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

col - i col - j

row - i row - j

Since the transmission congestion charge are also implied as the cost of transporting power from bus i to bus j, the charges are used for the selection to place TCSC-module on the line.

CASE STUDY

IEEE 30 Bus is employed as a case study in the paper. The examples of the cost function are obtained from the Electricity Generating Authority of Thailand. The marginal prices and congestion charge are illustrated in Figure 3-4.

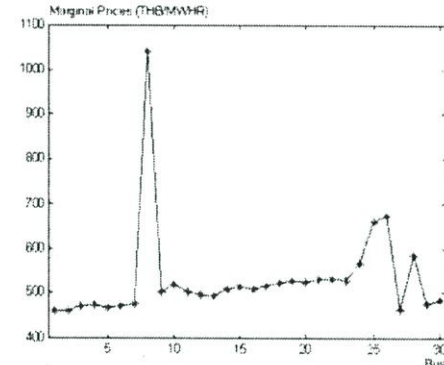


Figure 3. Marginal Price - Uncompensated

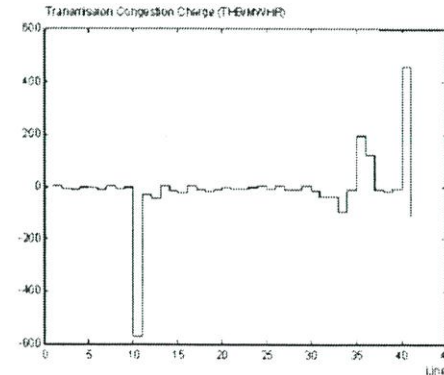


Figure 4. Transmission Congestion Charge - Uncompensated

From figure 3-4 the marginal prices are generally ranged between 460-1040 THB/MWHR approximately and their peaks are occurred at bus 8, 25 and 26 with the value of 1040, 661 and 672 THB/MWHR respectively. And for the transmission congestion charge, three peaks are appeared on line 10, 35 and 40 with the value of 570, 200 and 480 THB/MWHR. These lines are where the TCSC should be embedded on. Although the transmission line compensation can be made up to 60 % as discussed in the previous section, three levels of compensation are therefore made on line 10, 41 and 35 by setting the impedance of TCSC-module. The results of 40 % compensation of these lines are shown in figure 5-6. Large reduction in overall marginal prices and transmission congestion charges compared to those of the uncompensated system can be found in fig. 5-6 respectively. The prices are varied between 472-514 THB/MWHR with a highest and lowest point at bus 19 and 27, while the congestion charges are fluctuated between 0-24 THB/MWHR with many small-valued peaks appeared in the graph.

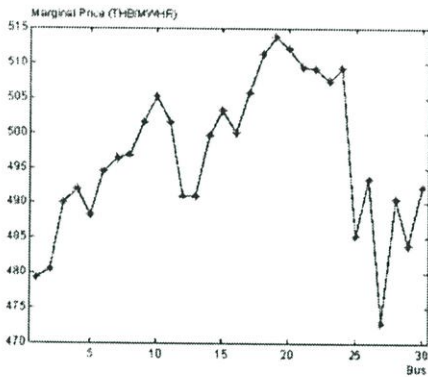


Figure 5. Marginal Price - 40% Compensation

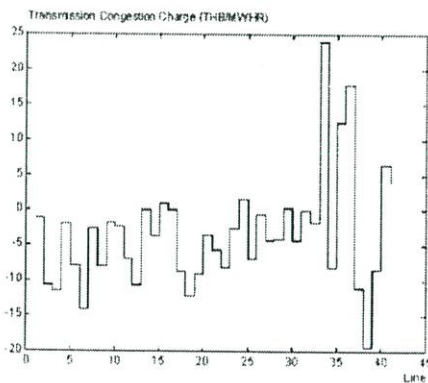


Figure 6. Transmission Congestion Charge - 40% Compensation

In figure 7-8 comparisons in the marginal price and transmission congestion charge between the normal and the compensated systems are illustrated. The marginal prices vary around 500 THB/MWHR for the compensated system and the peak is nearly twice less than that of normal system. In addition the large reduction of congestion charge is also achieved. The charges fluctuate in the range of 0 and 4.5 THB/MWHR and the highest is about 13 times less than that of normal system. For the system with 40% compensation not only the marginal prices and the transmission congestion are improved, 2 % decrease in the total generation cost (from approximately 45,260 THB/HR) and 2.85 % decrease in total loss (from approximately 3.51 MW) are also founded.

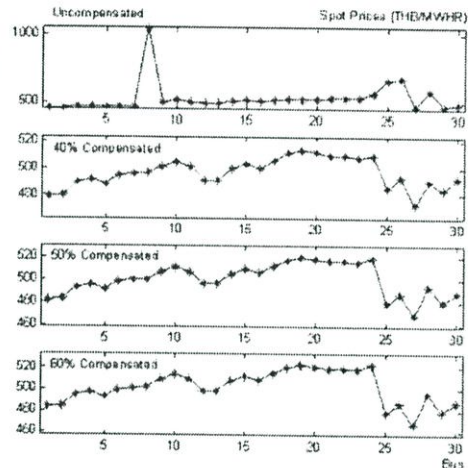


Figure 7. Marginal Price - three levels of Compensation

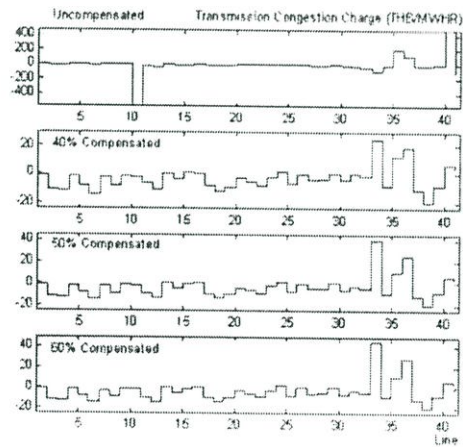


Figure 8. Transmission Congestion Charge - three levels of Compensation

ACKNOWLEDGEMENT

The financial supports from the National Science and Technology Development Agency (NSTDA) are appreciated. Also thank you to Ms. Wimolkae Wonglasin and Mr. Tanachai Limpasuwan, electrical engineers from the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) for their contribution and valuable comments.

SUMMARY

In this paper Thyristor Controlled Series Capacitor, used as a tool to reduce the transmission congestion charge, has been presented. The technique of predictor-corrector primal-dual interior point enhanced linear programming has used for the fast convergence of the computation. TCSCs have been placed on the transmission lines, in which the high congestion charges are provided, to mitigate the problem of congestion. The IEEE test system has been employed to verify the method presented. The dramatic decrease in the TCSC-embedded lines' congestion charges and the marginal price have been achieved. In addition the slight reduction in system loss and total generation cost have been founded.

REFERENCES

- [1] F. C. Schweppe *et al*, 1978, *Spot Pricing of Electricity*, KAP, Boston, USA.
- [2] K. Bhattacharya *et al*, 2001, *Operation of Restructured Power System*, KAP, Massachusetts, USA.
- [3] Ray D. Zimmerman and Deqiang Gan, 1997, *Matpower Version 2.0 User's Manual*, Power System Engineering Research Center-Cornell University, New York, USA.
- [4] Thomas W. Gedra, 1999, "On transmission congestion and pricing", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, 241-248.
- [5] S. G. Nash and A. Sofer, 1996, *Linear and Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, Singapore.
- [6] X. Wang *et al*, 2000, "Primal-Dual Interior Point Linear Programming Optimal Power Flow for Real-time Congestion Management", *IEEE PES Winter Meeting*, vol. 3, 1643-1649.
- [7] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, 1999, *Understanding FACTS Devices*, IEEE Press, New York, USA.
- [8] R. Kundur, 1994, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, USA.
- [9] W. Fang and G. B. Shrestha, 2001, "Allocation of TCSC devices to optimize total transmission capacity in a competitive power market", *IEEE PES Winter Meeting*, vol. 2, 587-593.

ประวัติผู้เขียน

นายสุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ วันเดือนปี เกิด 28 มกราคม 2520

ประวัติการศึกษา

มีนาคม 2538 : มัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) อันดับ 1

โรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย

เมษายน 2542 : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยม อันดับ 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

ประวัติทุนการศึกษา

พฤษภาคม 2538 : นักศึกษาโครงการวิศวกรช่างเผือก คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ธันวาคม 2541 : นักศึกษาทุนเรียนดีเยี่ยม บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

พฤษภาคม 2542 : นักศึกษาทุนโครงการบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ผลงานทางวิชาชีพวิศวกรรม

ออกแบบปรับปรุงอาคารเรียน อาคารสำนักงาน อาคารบ้านพัก โรงแรม ออกแบบต่อเติมโรงงาน
งานวางผังแม่บทโรงเรียน-มหาวิทยาลัย

Research Interest

Electrical System Design, Deregulated Market, Power System Economic, FACTS Device.

บทความวิชาการ

- 1) สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ และคณะ, “การคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า,”
วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, ธันวาคม 2543, หน้า 58 - 63.
- 2) สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ และคณะ, “ TCSC ในมุมมองของการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า,”
วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2545, หน้า 37 - 42.
- 3) สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ และคณะ, “ เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point
สำหรับการคิดราคาตลาดของไฟฟ้า,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 3, กันยายน 2545.
- 4) S. Faimuenwai *et al.*, “TCSC as a tool to reduce the transmission congestion charge,”
17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2003),
Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona, Spain, 12-15 May 2003.