



วิทยานิพนธ์

การประเมินการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า
ในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและค่าใช้สายส่ง

EVALUATIONS OF BILATERAL TRANSACTIONS IN
ELECTRICITY MARKETS IN ASPECTS OF
OPTIMAL DISPATCH AND TRANSMISSION PRICING

นายณรงค์ศักดิ์ เรืองโฉม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า
ในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและค่าใช้สายส่ง

Evaluations of Bilateral Transactions in Electricity Markets in
Aspects of Optimal Dispatch and Transmission Pricing

นามผู้วิจัย นายณรงค์ศักดิ์ เรืองโถม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานจิต ดำรงกุลกำจร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงษ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินการทำธุรกรรมไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า
ในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและค่าใช้สายส่ง

Evaluations of Bilateral Transactions in Electricity Markets in
Aspects of Optimal Dispatch and Transmission Pricing

โดย

นายณรงค์ศักดิ์ เรืองโหม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2551

ณรงค์ศักดิ์ เรืองโหม 2551: การประเมินการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและค่าใช้สายส่ง วิทยุวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ปานจิต ดำรงกุลกำจร, Ph.D. 51 หน้า

งานวิจัยนี้ เสนอการศึกษาการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้า และการคิดราคาสายส่ง โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด (Optimal Power Flow) พร้อมเสนอการคิดราคาสายส่งสำหรับผู้ค้าในตลาดทั้งหมดด้วยราคาไฟฟ้าที่บัส (Nodal Prices) การศึกษาได้ใช้โปรแกรม MATLAB ชื่อ MATPOWER ที่เพิ่มโค้ดโปรแกรมคำนวณการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในระบบ 30 บัส โดยทดสอบระบบด้วยหลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด (Optimal Power Flow) ใน 3 กรณี ดังนี้ กรณีแรก ศึกษาระบบที่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ผู้ผลิตและผู้ซื้อทำการซื้อขายผ่านตลาดกลางทั้งหมด กรณี 2 ระบบมีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี 1 คู่ โดยผู้ซื้อที่บัส 2 ซื้อกำลังไฟฟ้าที่ต้องการทั้งหมดจากผู้ผลิตที่บัส 2 กรณีสุดท้าย เมื่อระบบมีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีหลายคู่ โดยไหลที่บัส 2, 7 และ 8 ซื้อกำลังไฟฟ้าจากบัส 2 จากการใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ได้คำนวณและเปรียบเทียบค่าใช้สายส่ง รายได้ของผู้ผลิต และรายจ่ายของผู้รับซื้อกำลังไฟฟ้า ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

ผลจากการศึกษาระบบ 30 บัส แสดงให้เห็นว่าการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีนั้น มีนัยสำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อการใช้สายส่งกำลังไฟฟ้าในระบบและราคาไฟฟ้าที่บัส ซึ่งเป็นเหตุให้ค่าสายส่งเพิ่มขึ้น การศึกษาข้างสรุปได้ว่าราคาสายส่งอาจเป็นเครื่องมือที่ผู้ดูแลระบบนำมาควบคุมการใช้สายส่งอย่างได้ผล หากมีการแบ่งค่าสายส่งแก่ผู้ค้ากำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

Narongsak Ruangchom 2008: Evaluations of Bilateral Transactions in Electricity Markets in Aspects of Optimal Dispatch and Transmission Pricing. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Miss Parnjit Damrongkulkamjorn, Ph.D. 51 pages.

This thesis studies bilateral transactions in electricity markets in aspects of optimal dispatch, system flow and transmission pricing using optimal power flow. The study also introduces the evaluation of transmission pricing for all market participants by using nodal prices. The study is done by using MATLAB program called MATPOWER with additional codes for calculating bilateral transactions on a 30-bus system. Optimal power flow is applied to the test system in 3 different cases. The first case study is the system with no bilateral transaction; generators and loads sell and buy power through power pool. The second case is when the system has one bilateral transaction; load at bus 2 buys all its required power from generator at bus 2. The last case is when the system has several bilateral transactions; loads at buses 2, 7 and 8 buy power from generator at bus 2. Using the optimal power flow results, transmission costs, generator revenues and load expenditures in both bilateral and nonbilateral cases are then calculated and compared.

The results from the 30-bus test system show that bilateral transactions could have significant effects on system flow and nodal prices, causing transmission costs to change. The study also concludes that transmission pricing, if applied properly to all market participants, could be an effective tool for the system operator to regulate the use of transmission grids effectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.ปานจิต คำรงกุลกำจร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน และมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ณรงค์ศักดิ์ เรืองโถม

พฤษภาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	10
อุปกรณ์	10
วิธีการ	10
ผลและวิจารณ์	24
ผล	24
วิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	43
สรุป	43
ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	44
ภาคผนวก	46

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	15
2	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามกำลังไฟฟ้าที่ได้รับจัดสรร	18
3	เส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	24
4	กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	27
5	กำลังไฟฟ้าของโหลด	28
6	กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง	29
7	แรงดันพิกัดในระบบ	31
8	สายส่งที่ใช้งานเต็มพิกัดในระบบ	32
9	กำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าใช้จ่ายจากการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบ	32
10	ราคากลาง	33
11	ราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า	33
12	ราคาที่บัสของระบบ	34
13	ค่าสายส่งของทั้งระบบ	36
14	ค่าสายส่งของผู้ผลิต (\$/h)	37
15	ค่าสายส่งของผู้ซื้อ (\$/h)	37
16	รายได้ของผู้ผลิต (\$/h)	39
17	รายจ่ายของผู้ซื้อ (\$/h)	40
ตารางผนวกที่		
1	ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ 30 บัส	47
2	ข้อมูลค่าใช้จ่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ 30 บัส	47
3	ข้อมูลบัสในระบบ 30 บัส	48
4	ข้อมูลสายส่งในระบบ 30 บัส	49

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรีผ่านตลาดกลาง	11
2	การซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรีผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคี	11
3	ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	15
4	การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้า	16
5	ระบบ 30 บัส สำหรับศึกษากรณี 1	25
6	ระบบ 30 บัส สำหรับศึกษากรณี 2	25
7	ระบบ 30 บัส สำหรับศึกษากรณี 3	26

การประเมินการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า
ในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและค่าใช้สายส่ง

Evaluations of Bilateral Transactions in Electricity Markets in
Aspects of Optimal Dispatch and Transmission Pricing

คำนำ

งานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการศึกษาการซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรี สำหรับประเทศไทยนั้น ยังไม่มีการซื้อขายกำลังไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันระบบผลิตกำลังไฟฟ้ารับผิดชอบโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และระบบจำหน่ายรับผิดชอบโดยการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรี เช่นใน Integrated Nepal Power System (INPS) และ the National Grid Company ของประเทศอังกฤษ จะแยกระบบเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ระบบผลิต ระบบจำหน่าย และระบบสายส่ง เพื่อความสะดวกในการควบคุมดูแลและมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการซื้อขายจะกระทำผ่านตลาดกลาง (Power Pool) ภายใต้การควบคุมของศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระ การซื้อขายโดยทั่วไปจะผ่านตัวแทน โดยตัวแทนของแต่ละส่วนจะเสนอข้อมูลในส่วนที่รับผิดชอบ เช่น ฝ่ายผลิตจะเสนอข้อมูลของราคาและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ ผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าจะเสนอปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ เมื่อทราบข้อมูลทั้งของผู้ผลิตและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการแล้ว ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระ (Independent System Operator: ISO) ซึ่งเป็นผู้ดูแลระบบจะจัดสรรกำลังการผลิตให้กับผู้ผลิตแต่ละราย โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าและประสิทธิภาพของระบบเป็นหลัก เมื่อได้รับการจัดสรรแล้วผู้ผลิตจะผลิตกำลังไฟฟ้าตามที่ได้รับการจัดสรรให้กับตลาดกลาง โดยศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระจะเป็นองค์กรกลางดูแลการซื้อขายทั้งระบบ

จุดประสงค์ของการเปิดตลาดซื้อขายกำลังไฟฟ้เสรีนั้น ก็เพื่อให้ผู้ใช้เลือกซื้อกำลังไฟฟ้าจากผู้ผลิตได้ตามที่ต้องการ ทำให้เกิดการซื้อขายแบบไม่ผ่านตลาดกลางขึ้น โดยการซื้อขายดังกล่าวจะกระทำภายใต้ข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อ โดยไม่ผ่านตลาดกลาง เรียกว่าเป็นการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Contract) อย่างไรก็ตามในการซื้อขายนั้น ต้องมีการส่งกำลังไฟฟ้าผ่าน

สายส่ง ซึ่งใช้ร่วมกับการซื้อขายผ่านตลาดกลาง จึงต้องพยายามหาวิธี เพื่อแยกค่าใช้จ่ายสายส่งของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีออกจากส่วนกลาง งานวิจัยที่ผ่านมาจะทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อระบบ อันเกิดจากการการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในระบบ โดยศึกษาเกี่ยวกับ การใช้สายส่งเต็มพิกัด และกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ และวิธีการเก็บค่าใช้จ่ายเพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบจากการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี โดยงานวิจัยที่ผ่านมาจะเน้นการคิดค่าใช้จ่ายสายส่งกับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีเป็นหลัก

การคิดค่าใช้จ่ายสายส่งในงานวิจัยนี้ จะคิดค่าใช้จ่ายสายส่งทั้งระบบ คือ ทั้งผู้ซื้อผ่านตลาดกลาง และผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีไปพร้อมกัน โดยใช้ราคาทีบัส (Nodal Prices) ที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ให้ผลดีที่สุด (Optimal Power Flow: OPF) อันมีฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) เป็นเส้นโค้งราคา (Cost Curve) ของเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า ที่สามารถหาได้จากตารางราคากำลังไฟฟ้าที่ผู้ผลิตเสนอแก่ตลาดกลาง โดยคำนึงถึงการใช้สายส่งเต็มพิกัด และกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบด้วย โดยศึกษาในระบบจำลอง IEEE 30 บัส ซึ่งผลการคำนวณจาก OPF จะนำไปวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) ในระบบด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบการซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรี และการทำงานขององค์กรที่เกี่ยวข้องกับระบบการซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรี
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาแนวทางการคำนวณค่าใช้จ่ายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
3. เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในกรณีมีการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกับกรณีไม่มีการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาด
4. เพื่อเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบในกรณีมีการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกับกรณีไม่มีการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาด

การตรวจเอกสาร

การซื้อขายไฟฟ้าเสรี

Wakefield et al. (1997) เสนอความสำคัญของสายส่งที่ใช้เชื่อมระหว่างผู้ผลิตและผู้รับกำลังไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศอื่นๆ ที่มีการเพิ่มระดับการแข่งขันในกลุ่มผู้จำหน่ายกำลังไฟฟ้า นับตั้งแต่รัฐบาลสหรัฐผ่านกฎหมายพลังงานในปี 1992 ส่งผลให้การเข้าใช้สายส่งเป็นไปอย่างเสรีและเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเข้าใช้งานสายส่งที่เพิ่มขึ้นได้กลายเป็นประเด็นที่สำคัญและมีการศึกษาโดย IEEE Task Force on Transmission Access พร้อมจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับประเด็นดังกล่าว ผลต่อมาก็คือต้องมีการกำหนดค่าใช้จ่ายสายส่งให้แก่ผู้ใช้สายส่ง ทั้งที่มีการใช้ในทางตรงและทางอ้อม เพื่อเป็นการควบคุมค่าใช้จ่ายและราคาของแต่ละส่วนอย่างเหมาะสม เมื่อตระหนักถึงประเด็นดังกล่าวแล้ว Electric Power Research Institute (EPRI) จึงเริ่มทำวิจัยในโครงการ Research Project RP3216-1 โดยใช้ชื่อว่า Development of a Comprehensive Framework for Analyzing Transmission Services and Evaluating Their Costs ผลสรุปทั้งหมดได้เสนอในรายงานของ EPRI 2 ฉบับ ซึ่งในบทความได้ยกแนวทางการคิดค่าใช้จ่ายสายส่งมา 3 แนวทาง คือ กำหนดลักษณะการใช้สายส่ง, กำหนดค่าใช้จ่ายสายส่งตามลักษณะการใช้ และคำนวณค่าใช้จ่ายสายส่ง และได้ศึกษาใน 3 ประเด็นคือ ผลกระทบกับค่าใช้จ่ายทั้งระบบที่เกิดจากสายส่ง, ผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบและความจำเป็นในการติดตั้งกำลังสำรองเพิ่ม อันเกิดจากการใช้สายส่ง และ การกำหนดราคาสายส่งที่จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทั้งระยะสั้นและระยะยาว

Zhang et al. (2000) เสนอรูปแบบและวิธีการในการคำนวณราคาเสนอที่ดีที่สุด รวมถึงตารางการเดินเครื่องและเวลาพักเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน New England รูปแบบการนำเสนอที่พิจารณาตามที่ ISO กำหนดและความผันแปรของข้อมูลของผู้ผลิตรายอื่น ซึ่งบทความได้นำเสนอการคำนวณตามรูปแบบของ ISO จากนั้นจึงได้เสนอการคำนวณด้วย Lagrangian relaxation และทดสอบผลด้วยการใช้ค่าเวลาทำงานของ CPU

การทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

Galiana et al. (2002) เสนอการศึกษาในระดับที่เหมาะสม ในการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ร่วมกับระบบการซื้อขายกำลังไฟฟ้าในตลาดกลาง เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการระบบซื้อขายไฟฟ้าเสรี โดยจุดประสงค์หลักคือ การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการซื้อขายในตลาดและแบบทวิภาคีในด้านระดับการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายกับความเสถียรของระบบที่จะเกิดการใช้งานสายส่งเต็มพิกัด ดังนั้นความเข้าใจในระดับการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้าในระบบ ทั้งการซื้อขายในตลาดกลางและแบบทวิภาคี จึงเป็นสิ่ง ที่ควรให้ความสำคัญเป็นอันดับแรก การวิเคราะห์จะคำนึงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดและ ค่าใช้จ่ายของระบบต่อน้อยที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดของสายส่งและระดับความสามารถในการผลิต โดยจะกำหนดให้ระดับการผลิตต่ำสุดของผู้ผลิตที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ต้องผลิตกำลังไฟฟ้า เท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ได้ทำสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีไว้แล้ว ซึ่งผลจากการคำนวณจะให้ ระดับการผลิตและราคาในแต่ละบัสของระบบ พร้อมการคำนวณรายได้ผู้ผลิตได้ตั้งสมการ (1) และ รายจ่ายของผู้รับกำลังไฟฟ้างตั้งสมการ (2)

$$R_{gi} = \lambda_i (P_{gi} - P_{gi}^b) + \sum_{j=1}^n \pi_{ij} GD_{ij} - \sum_{j=1}^n \left(\frac{\lambda_j - \lambda_i}{2} \right) GD_{ij} \quad (1)$$

$$E_{dj} = \lambda_j (P_{dj} - P_{dj}^b) + \sum_{i=1}^n \pi_{ij} GD_{ij} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_j - \lambda_i}{2} \right) GD_{ij} \quad (2)$$

โดย	R_{gi}	คือ รายได้ของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า
	E_{dj}	คือ รายจ่ายของผู้รับกำลังไฟฟ้า
	λ	คือ ราคาพลังงานไฟฟ้าที่บัสของผู้ผลิต i หรือผู้รับกำลังไฟฟ้า j
	P_{gi}	คือ กำลังไฟฟ้าของผู้ผลิตแต่ละราย
	P_{dj}	คือ กำลังไฟฟ้าของผู้ซื้อแต่ละราย
	P_{gi}^b	คือ กำลังไฟฟ้าของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าแต่ละรายที่ผลิตให้กับตลาดกลาง
	P_{dj}^b	คือ กำลังไฟฟ้าของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าแต่ละรายที่ซื้อให้กับตลาดกลาง
	π_{ij}	คือ ราคาไฟฟ้าสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

GD_{ij} คือ ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกส่งจากผู้ผลิตบัส i ไปยังผู้รับบัส j
สำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

n คือ จำนวนคู่สัญญาที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

สำหรับการคำนวณได้ใช้ระบบ 5 บัส โดยการซื้อขายแบบทวิภาคีนั้นเป็นซื้อขายแบบระดับ
กำลังไฟฟ้าของระบบคงที่ และสามารถเลือกระดับการซื้อขายทั้ง 2 แบบ ดังนี้

1. ซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี 58.8% ของระบบ
2. ซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี 91.2% ของระบบ
3. ซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี 100% ของระบบ

จากการศึกษาทั้ง 3 กรณี พบว่า

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของ 2 กรณีแรก มีค่าเท่ากัน
2. ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น 0.2%
3. เนื่องจากเกิดการใช้งานสายส่งจนเต็มพิกัด ทำให้ผู้ซื้อไฟฟ้าในตลาดต้องซื้อ
กำลังไฟฟ้าที่แพงมากขึ้น
4. มีผลกระทบต่อราคาไฟฟ้าที่บัสอย่างชัดเจน
5. มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าส่งกำลังไฟฟ้าของผู้ซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคีของแต่ละ
กรณีค่อนข้างมาก

บทความของ Galiana et al. (2003) เสนอวิธีการแบ่งค่าสายส่งแก่ผู้ใช้สายส่งแบบใหม่ โดย
ใช้หลัก Equivalent bilateral exchanges กล่าวคือเมื่อได้วางกฎเกณฑ์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นที่
เรียบร้อยแล้ว ผู้ซื้อไฟฟ้าแต่ละรายจะกำหนดกำลังไฟฟ้าของผู้ผลิตแต่ละราย และผู้ผลิตก็จะผลิต
ตามกำลังไฟฟ้าที่ได้กำหนดจากผู้ซื้อในรูปแบบเดียวกัน วิธีที่เสนอมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ความเป็น

อิสระในการเลือกบัสอ้างอิง (Slack bus) การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ตรวจสอบได้ และการเก็บค่าสายส่งมีความคงที่และมีค่าเป็นบวกเสมอ

Pantos et al. (2003) เสนอการทำธุรกิจไฟฟ้ากับเทคนิคการคิดราคาสายส่ง โดยเสนอการหาเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อหาว่าผู้ทำธุรกิจไฟฟ้ามีการใช้งานสายส่งเส้นนั้นๆ มากเพียงใดเมื่อเทียบกับผู้ใช้ทั้งระบบโดยวิเคราะห์จากการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บข้อมูลในหลายระบบที่มีรูปแบบการซื้อขายแตกต่างกันไป ซึ่งการศึกษานี้กระทำกับข้อมูลจริงของแต่ละระบบ ซึ่งพบว่าการกระจายการไหลของกำลังไฟฟ้าของไหลคบนสายส่งนั้น ขึ้นกับรูปแบบการทำงานของระบบ เป็นการชี้ให้เห็นว่าวิธีคิดราคาสายส่ง ตามการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งนั้นสามารถใช้ได้จริง โดยราคาสายส่งของแต่ละบัสจะคำนวณด้วยข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้า เช่น ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของปีที่ผ่านมา เป็นต้น

Baniya et al. (2005) เสนอการศึกษาผลกระทบจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีร่วมกับตลาดกลาง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการใช้สายส่งเต็มพิกัดและมีการสูญเสียในระบบได้ เพื่อให้การคาดการณ์มูลค่าที่จะเกิดจากการใช้สายส่งเต็มพิกัดและการสูญเสียที่แม่นยำมากขึ้น บทความนี้จึงเสนอแนวทางในการคำนวณค่าใช้สายส่งจากผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีภายในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า ซึ่งปกติจะมี 3 รูปแบบอันได้แก่ การซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีตามข้อกำหนด การซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีเสรี และการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบผสม ซึ่งในบทความจะศึกษาภายใต้การซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีเสรีร่วมกับแบบผสม โดยรูปแบบดังกล่าว จะไม่รวมอยู่ในตลาดและไม่คำนึงถึงเรื่องความปลอดภัยด้วย ในส่วนของตลาดจะรับผิดชอบโดย Power Exchange (PX) ส่วนการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีจะรับผิดชอบโดย Scheduling Coordinators (SCs) โดยทั้ง 2 ส่วนยังคงทำงานภายใต้การดูแลระบบของ ISO เพื่อให้ระบบยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการคิดค่าสายส่งนั้นประกอบด้วย ค่าเชื่อมต่อ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ค่าการใช้สายส่งเต็มพิกัด ค่าจัดทำบัญชีและค่าบริการ และค่าชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน เพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจน จึงแสดงการคำนวณค่าใช้สายส่งกับระบบ Modified IEEE 30-bus RTS และ Integrated Nepal Power System (INPS) ขนาด 58 บัส ประกอบด้วยเครื่องผลิตไฟฟ้า 8 เครื่อง และ 91 สายส่ง ซึ่งผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า วิธีคิดค่าใช้สายส่งจากผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีนั้น ส่งผลดีกับผู้ทำสัญญาในระยะยาว แต่สามารถส่งผลเสียได้หากมีการใช้งานสายส่งเต็มพิกัดและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบมากเกินไป

การคิดค่าสายส่ง

Shirmohammad et al. (1996) เสนอเทคนิคพื้นฐานเพื่อคิดค่าใช้จ่ายระบบด้วยราคาสายส่งพร้อมยกตัวอย่างหลักการเบื้องต้นของการคิดราคาสายส่งและแสดงวิธีคิดราคาสายส่งจากค่าสายส่งที่ต่ำกว่าเดิม นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงรูปแบบและวิธีที่ใช้ในแง่ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ บทสรุปของบทความได้จากการนำบางรูปแบบที่เสนอไปประยุกต์ใช้กับการคิดราคาสายส่งในประเทศบราซิล ส่วนสำคัญในการพิจารณาราคาสายส่งคือ ต้องพิจารณาอย่างมีเหตุผลและถูกต้องตามหลักการ ซึ่งหลักการคิดค่าใช้จ่ายสายส่งด้วยราคาสายส่งนั้นนับเป็นมูลค่าเพิ่มที่สำคัญและมีองค์ประกอบจากหลายส่วนตามตัวอย่างในแต่ละรูปแบบ นอกจากนั้นยังเสนอแนวทางการใช้งานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและความคุ้มค่าแก่ระบบให้มากที่สุด โดยเป้าหมายสูงสุดคือ การนำกลไกราคาสายส่งไปหมุนให้ค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ไฟลดลง

Singh et al. (1998) เสนอการศึกษาการจัดการค่าใช้จ่ายอันเกิดจากข้อจำกัดของสายส่งในตลาดไฟฟ้าเสรี เช่น การใช้งานสายส่งเต็มพิกัด ซึ่งได้ยกตัวอย่าง 2 วิธี แบบแรกใช้ราคาที่บัส (Nodal Prices) จากการซื้อขายผ่านตลาดกลาง (Pool) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางการเงินเพื่อให้เห็นการใช้ราคาที่บัสมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นพร้อมยกตัวอย่างการทดสอบกับระบบขนาดใหญ่ แบบที่สองการแบ่งค่าใช้จ่ายสำหรับการซื้อขายแบบทวิภาคี (Bilateral) พร้อมอธิบายพื้นฐานของวิธีการ อันประกอบด้วย game-theoretic ซึ่งใช้คำนวณในบางส่วน ทั้งการซื้อขายผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคีนั้น เป็นประเด็นที่ระบบไฟฟ้าที่ปรับโครงสร้าง เช่น แคลิฟอร์เนีย ต้องทำความเข้าใจในแง่เศรษฐศาสตร์ให้มากขึ้นเพราะยังเป็นเรื่องใหม่ ของระบบไฟฟ้า โดยราคาที่บัสนั้นให้ผลราคาที่ถูกต้องตามตำแหน่งติดตั้งก็จริง แต่จะมีความแตกต่างของราคาอย่างไม่มีกฎเกณฑ์หากนำไปใช้กับผู้ซื้อขายแบบทวิภาคี ส่วนสำคัญของราคาที่บัสนั้นเกี่ยวข้องกับการเป็นเครื่องมือทางการเงินซึ่งยังไม่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป เพื่อจัดการใช้สายส่งเต็มพิกัดจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีทำให้การจัดสรรกำลังไฟฟ้าของส่วนกลางเป็นไปอย่างจำกัด ถึงแม้ว่าฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับจัดการการใช้สายส่งเต็มพิกัดจะไม่แน่ชัด แต่สามารถใช้สมการค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดได้ ซึ่งการจัดการระบบที่มีขีดจำกัดทั้ง 2 แบบ ควรให้ผลต่างของค่าใช้จ่ายที่เกิดจากขีดจำกัดของระบบที่ผู้ซื้อไฟต้องจ่ายมีค่าเท่ากัน

Gedra (1999) เสนอวิธีคำนวณราคาที่ใช้สายส่งที่มากที่สุด ค่าใช้สายส่งเต็มพิกัด พร้อมยกตัวอย่างประกอบ โดยใช้ค่าประมาณจาก DC Load Flow และแสดงค่าใช้จ่ายของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง นอกจากนี้ยังวิเคราะห์การขยายสายส่ง และยกตัวอย่างการศึกษาการทำสัญญาซื้อขายในระยะยาว ทั้งมาตรการป้องกันและการลงทุน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการทำสัญญาในระบบด้วยมาตรการราคาในระยะยาวเป็นการส่งเสริมให้มีการลงทุนทั้งผู้ผลิตและผู้ซื้อ และมีโอกาสป้องกันความเสี่ยงในเรื่องของราคาได้ ซึ่งเป็นข้อดีของการทำสัญญาซื้อขายล่วงหน้า อย่างไรก็ตามยังเป็นการไม่เหมาะสม ที่จะใช้การเก็บค่าใช้สายส่งเต็มพิกัดเพื่อส่งเสริมให้มีการลงทุนในระบบสายส่ง

Leotard and IliC (1999) เสนอปัญหาของค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดของระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยหลายส่วน ซึ่งถือว่าฟังก์ชันราคาที่ใช้ในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นเป็นฟังก์ชันที่ดีแล้ว แต่ในบทความได้นำเสนอว่าฟังก์ชันเป้าหมายของระบบสายส่งไม่สามารถวิเคราะห์แยกจากระบบผลิตอย่างเป็นอิสระได้ ในงานเสนอหลายชิ้นได้เสนอว่า การวิเคราะห์สายส่งในระยะสั้นจะขึ้นกับแหล่งจ่ายของระบบ ส่วนการวิเคราะห์ในระยะยาวจะขึ้นกับระบบสายส่งเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากรายได้ของระบบที่เกิดขึ้นมาจากผู้ซื้อไฟเพียงฝ่ายเดียว ซึ่งต้องจ่ายตามกำลังการผลิต ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบสายส่งจึงไม่อาจแยกตัวออกจากระบบผลิตได้

Chen et al. (2002) เสนอการศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบราคาที่ใช้ (Nodal Prices) ที่มีส่วนสัมพันธ์กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น กำลังการผลิต, การใช้สายส่งเต็มพิกัด, ข้อจำกัดของแรงดันไฟฟ้า และ ข้อจำกัดหรือองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวไม่เพียงนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพระบบและจัดการการใช้สายส่งเต็มพิกัดได้เท่านั้น แต่ยังใช้กำหนดราคาไฟฟ้าได้อย่างมีเหตุผล หรือใช้เป็นเครื่องชี้ถึงความคุ้มค่าในการลงทุนในระบบผลิตและระบบสายส่ง

Gil et al. (2006) เสนอวิธีแบ่งค่าใช้จ่ายสายส่งด้วยการควบคุมราคาไฟฟ้าที่บัส วิธีที่ใช้จะเกี่ยวกับการผลิตและการใส่กำลังไฟฟ้าเข้าไปในบัสในการคำนวณการจัดสรรกำลังไฟฟ้าทั่วไป เพื่อให้เกิดผลต่างของของราคาที่ใช้ ที่ครอบคลุมความต้องการรายได้จากการใช้สายส่งเต็มพิกัด ราคาไฟฟ้าแบบใหม่ไม่เพียงสะท้อนค่าใช้จ่ายอันเกิดจากข้อจำกัดของสายส่งแต่ยังสะท้อนถึงค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนของระบบด้วย

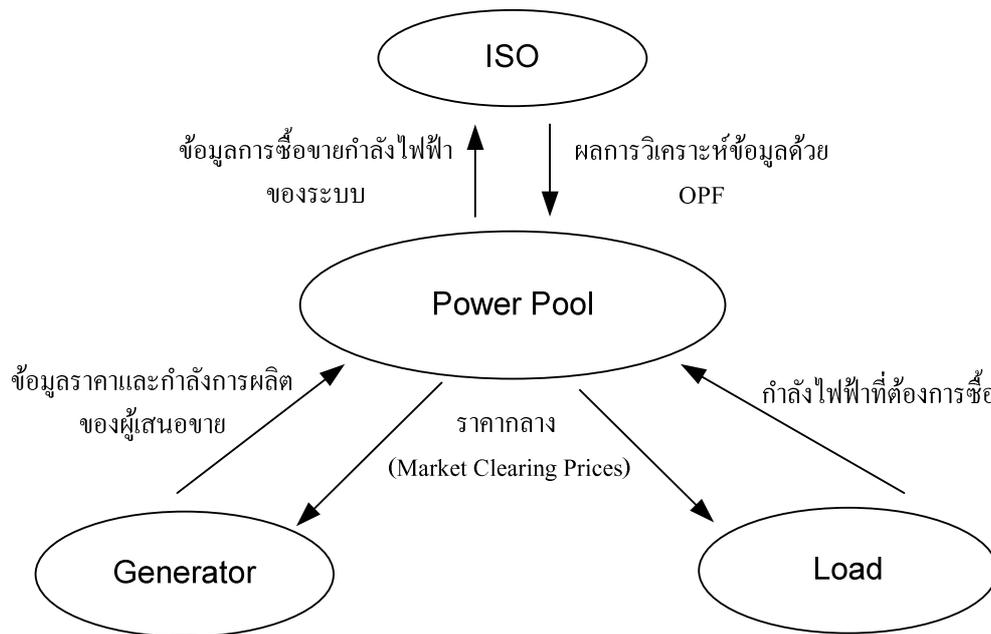
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

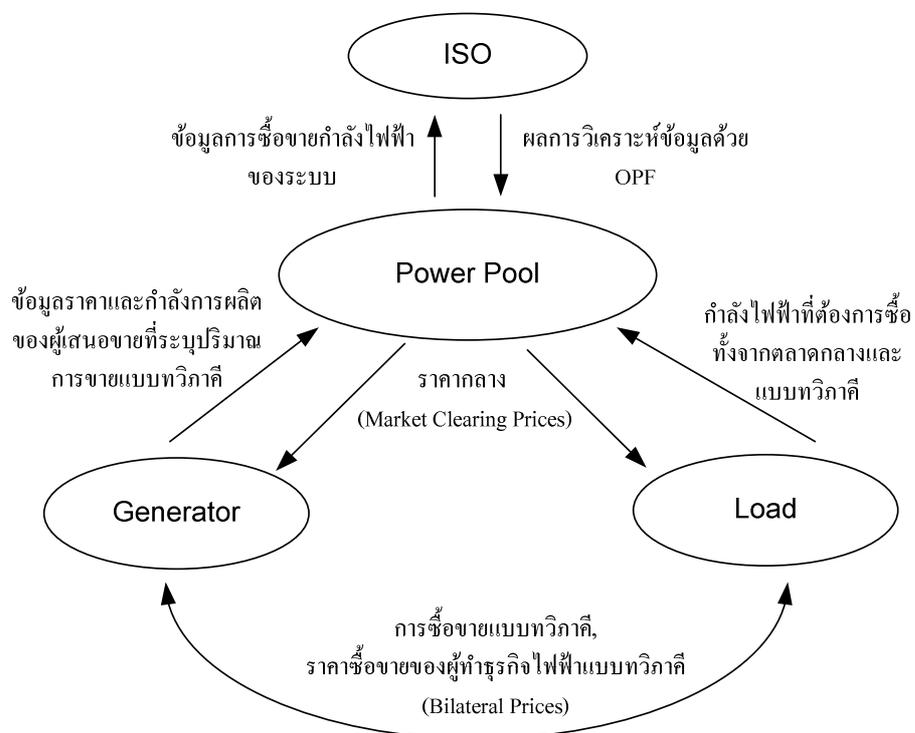
1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)
2. ระบบปฏิบัติการ Window Vista
3. โปรแกรม Matlab
4. โปรแกรม Microsoft Office

วิธีการ

งานวิจัยนี้ เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จะซื้อขายในระบบ และเส้นโค้งราคาที่ได้จากราคาเสนอขายของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในวิธีวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ให้ผลดีที่สุด (OPF) ซึ่งผลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า พร้อมนำกำลังไฟฟ้าที่ผู้ผลิตได้รับจัดสรรไปหาราคากลาง (Market Clearing Prices) เพื่อใช้เป็นราคาสำหรับการซื้อขายกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง ส่วนราคาซื้อขายแบบทวิภาคีจะกล่าวแยกต่างหาก สำหรับค่าราคาที่บัส (Nodal Prices) ที่ได้จาก OPF จะนำไปคิดค่าใช้จ่ายสายส่ง เมื่อทราบราคาซื้อขายพร้อมค่าใช้จ่ายสายส่งแล้วจึงนำไปคำนวณรายได้และรายจ่ายของผู้ผลิตและผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าตามลำดับ



ภาพที่ 1 การซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรีผ่านตลาดกลาง



ภาพที่ 2 การซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรีผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคี

1. การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าในระบบที่มีการซื้อขายไฟฟ้าเสรี

การซื้อขายกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง (Power Pool Transactions) ผู้ผลิตจะเสนอราคาขายและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ให้แก่ตลาดกลาง พร้อมกันนั้นผู้ซื้อต้องส่งข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้กับตลาดกลางด้วย ข้อมูลจากทั้งสองส่วนจะถูกส่งให้กับศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระ (Independent System Operator: ISO) เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ให้ผลดีที่สุด หากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จะซื้อขายทำให้ระบบขาดเสถียรภาพทางไฟฟ้า อาจจำเป็นต้องปรับปริมาณกำลังไฟฟ้าในส่วนของ ผู้ผลิตหรือส่วนของผู้ซื้อ หรือทั้งสองส่วนตามแต่จะตกลง กรณีไม่มีผลกระทบต่อระบบเกินที่จะยอมรับ ISO จะส่งข้อมูลจากการวิเคราะห์ให้กับตลาดกลางเพื่อใช้ประกาศราคาตลาด (Market Clearing Prices) ดังภาพที่ 1

การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Transactions) แม้กำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายจะไม่กระทำผ่านตลาดกลาง แต่ยังคงใช้สายส่งร่วมกับตลาดกลาง ดังนั้นผู้ซื้อและผู้ผลิตที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี จึงต้องส่งข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่จะซื้อขายให้กับตลาดกลางด้วย เพื่อให้ผู้ดูแลระบบวิเคราะห์การทำงานของระบบได้ เป็นผลให้กำลังไฟฟ้าที่ต้องผลิตแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ผลิตให้กับตลาดกลางและส่วนที่ผลิตให้กับการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ดังสมการ (3)

$$P_g = P_g^p + P_g^b \quad (3)$$

โดย P_g คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผู้ผลิตต้องจ่ายให้กับ โหลดทั้งระบบ

P_g^b คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องผลิตเพื่อจ่ายให้ตามที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

ต้องการ

P_g^p คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องผลิตเพื่อจ่ายให้กับ โหลดที่ซื้อขายผ่านตลาดกลาง

ทำนองเดียวกัน ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผู้ซื้อต้องการทั้งหมด จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการซื้อจากตลาดกลางและซื้อผ่านการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ดังสมการ (4)

$$P_d = P_d^p + P_d^b \quad (4)$$

โดย P_d คือ เวกเตอร์ ($n \times 1$) กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการทั้งหมด ในระบบที่มี n บัส

P_d^b คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีต้องการ

P_d^p คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ตลาดกลางต้องการ

สำหรับข้อมูลของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีจะเขียนในรูปเมทริกซ์ GD เช่น การทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ในระบบ 5 บัส ระหว่างผู้ผลิตบัส 1 กับผู้ซื้อที่บัส 3 ขนาด กำลังไฟฟ้า 15 MW เขียนเป็นเมทริกซ์ขนาด (5×5) ได้ดังนี้

$$GD = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดย GD คือ เมทริกซ์ของกำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกส่งจากบัส i ของผู้ผลิตไปยังผู้รับบัส j ของผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ผู้ผลิตต้องส่งให้กับผู้ซื้อในการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีคือ

$$P_{gi}^b = \sum_{j=1}^n GD_{ij} \quad (6)$$

ในทำนองเดียวกันกำลังไฟฟ้าจริงที่ผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีต้องการ คือ

$$P_{dj}^b = \sum_{i=1}^n GD_{ij} \quad (7)$$

ในการซื้อขายผู้ซื้อขายแบบทวิภาคีต้องเสนอข้อมูลการซื้อขายให้กับตลาดกลาง เช่นเดียวกับผู้ซื้อและผู้ผลิตที่ซื้อขายผ่านตลาดกลาง ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งให้กับ ISO เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ให้ผลดีที่สุด หากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จะซื้อขายทำให้ระบบขาดเสถียรภาพทางไฟฟ้า อาจจำเป็นต้องปรับปริมาณกำลังไฟฟ้าในส่วนของตลาดกลางหรือส่วนของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี หรือทั้งสองส่วน

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ปรับกำลังไฟฟ้าในส่วนของตลาดกลาง คือคงกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายแบบทวิภาคีไว้ตามปริมาณในสัญญาซื้อขาย (Firm) (Galiana et al., 2002) กรณีไม่มีผลกระทบต่อระบบเกินที่จะยอมรับ ISO จะส่งข้อมูลจากการวิเคราะห์ให้กับตลาดกลางเพื่อใช้ประกาศราคากลางให้แก่ผู้ผลิตและผู้ซื้อผ่านตลาดกลาง ส่วนราคาซื้อขายของผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Prices) นั้น ตลาดกลางจะไม่ทราบข้อมูลเนื่องจากราคาซื้อขายผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีจะตกลงราคากันเอง ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจะแสดงการหาราคาในลำดับถัดไป

2. เส้นโค้งราคา (Cost Curve)

เมื่อทราบข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จะซื้อขายในระบบแล้ว ข้อมูลอีกส่วนที่ต้องทราบก่อนวิเคราะห์ระบบด้วย OPF คือเส้นโค้งราคาซึ่งหาได้จากราคาขายที่ผู้ผลิตเสนอราคากำลังไฟฟ้าในรูปตารางข้อมูลให้กับตลาดกลาง โดยตารางดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับราคาไฟฟ้าที่จะผลิต ดังตารางที่ 1 โดยข้อมูลชุดนี้ผู้ดูแลระบบจะเป็นผู้นำไปใช้เพื่อทดสอบระบบที่มีการตกลงซื้อขายกำลังไฟฟ้า เพื่อทดสอบเกี่ยวกับ สมรรถนะหรือข้อจำกัดของระบบ เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาในระบบ เพราะหากผู้ดูแลระบบ สั่งให้ระบบทำงานตามข้อมูลราคาเสนอขายที่ผู้ผลิตเสนอขาย โดยไม่คำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ของระบบแล้ว อาจทำให้ระบบไม่สามารถรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเส้นโค้งราคา (Cost Curve) ของผู้ผลิต เพื่อนำไปเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ในการวิเคราะห์ด้วย OPF

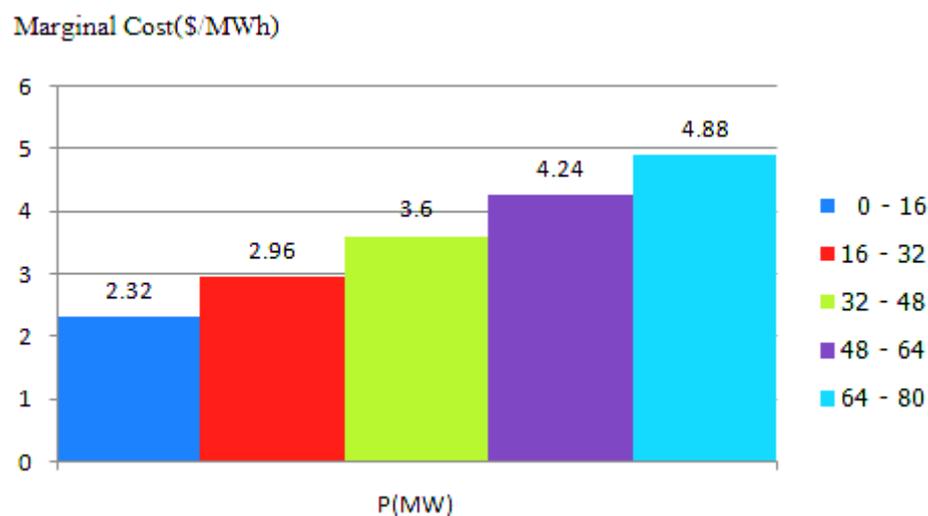
การหาเส้นโค้งราคา เริ่มจากการนำข้อมูลราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าซึ่งแบ่งเป็น 5 ช่วงดังตารางที่ 1 ไปหาพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละช่วง MW ดังภาพที่ 3 ซึ่งเป็นค่าใช้จ่าย (Cost) ของการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงนั้นๆ ดังตารางที่ 1 จากนั้นนำราคาแต่ละช่วงมาเขียนเป็นเส้นกราฟ แล้วใช้ Excel หาค่า Coefficients ในรูปสมการ Polynomial กำลัง 2 ดังสมการ

$$C_i = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (8)$$

จากภาพที่ 4 จะได้สมการ

$$C_i = 0.04 p^2 + 2p \quad \$/h \quad (9)$$

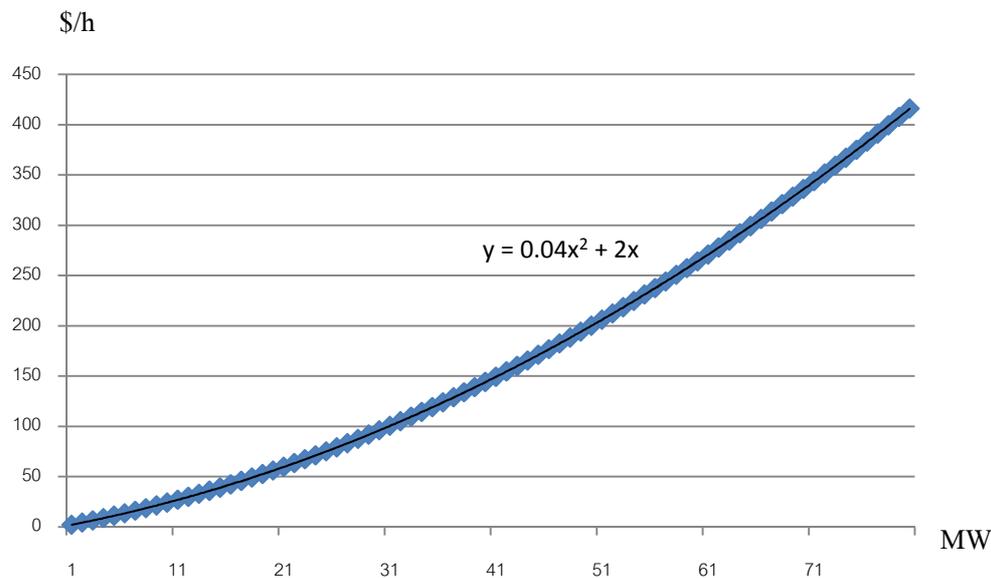
ซึ่งสมการเส้นโค้งราคาที่ได้นำไปใช้ในการคำนวณของ OPF ในลำดับถัดไป



ภาพที่ 3 ตัวอย่างราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1

Power (MW)	Bidding Prices (\$/MWh)	Cost (\$/h)
0-16	2.32	42.24
16-32	2.96	104.96
32-48	3.60	144.00
48-64	4.24	291.84
64-80	4.88	416.00



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1

3. วิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ให้ผลดีที่สุด (OPF) เมื่อระบบมีการซื้อขายนอกตลาดกลางแบบกำลังไฟฟ้าคงที่

การคำนวณ OPF จะนำข้อมูลกำลังไฟฟ้า เส้นโค้งราคา และข้อมูลระบบ ที่จำกัดความจุของสายส่ง (ดูภาคผนวก) เพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยถือว่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบมีค่าคงที่ และคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด (Galiana et al., 2002)

$$\underset{P_g, Q_g}{\text{Min}} C(P_g) \quad (10)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} s.t. & (P_g, Q_g) \in S \\ & P_g \geq P_g^b = GD.e \end{aligned}$$

โดย $C(P_g)$ คือ ค่าใช้จ่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด

S คือ ข้อกำหนดการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ

e คือ เวกเตอร์ $[1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ ขนาด $n \times 1$ เมื่อ n เป็นจำนวนหลักของ GD

ซึ่ง $C(P_g)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$C(P_g) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{gi}) \quad (11)$$

โดย $C_i(P_{gi})$ คือ ค่าใช้จ่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละรายที่เสนอให้กับตลาดกลาง

ส่วน S คือ ข้อกำหนดการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ อันได้แก่

$$\begin{aligned} P_{gi}^{\min} &\leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \\ Q_{gi}^{\min} &\leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \\ V_{gi}^{\min} &\leq V_{gi} \leq V_{gi}^{\max} \\ P_g &= P_d + P(\delta, V) \\ Q_g &= Q_d + Q(\delta, V) \\ |S_l(\delta, V)| &\leq S_l^{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

จากสมการ (10) สามารถหา P_g^p ได้จาก

$$P_g^p = P_g - P_g^b \quad (13)$$

โดย $P_g \geq P_g^b$ ในสมการ (10) นั้น เป็นการบังคับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าไม่น้อยกว่าที่ตกลงไว้กับผู้ซื้อแบบทวิภาคีให้กับผู้ซื้อแบบทวิภาคี แม้จะเป็นการผลิตให้แก่ผู้ซื้อแบบทวิภาคีทั้งหมดก็ตาม จากข้อกำหนดที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการใช้งานสายส่งจนเต็มพิกัดและอาจส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของราคาที่บัสได้

ผลจากการคำนวณด้วย OPF จะได้ กำลังการผลิตของผู้ผลิต กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ข้อจำกัดของระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ค่าใช้จ่ายของระบบ และราคาที่บัส สำหรับกำลังการผลิต

ของผู้ผลิตจะใช้หาราคากลาง ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและราคาที่มีจะนำไปคำนวณค่าสายส่งดังจะกล่าวในลำดับถัดไป

4. ราคาตลาด (Market Clearing Price: MCP)

ผลจากการคำนวณด้วย OPF จะได้กำลังผลิตของผู้ผลิตแต่ละราย P_{gi} ตามที่ได้รับการจัดสรรจากโปรแกรม ในที่นี้จะนำมาหาราคากลางเพื่อใช้คำนวณรายได้ของผู้ผลิตและรายจ่ายของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าที่ทำการซื้อขายผ่านตลาดกลาง การหาราคากลางเริ่มจากการนำกำลังผลิตของผู้ผลิตแต่ละราย P_{gi} ไปหาราคาของผู้ผลิตแต่ละรายตามช่วงกำลังผลิตตามตารางราคาที่เสนอให้กับตลาดกลาง เช่น ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า ได้รับจัดสรรกำลังผลิตขนาด 41.54 MW จากตารางที่ 2 พบว่ากำลังผลิตอยู่ในช่วง 32-48 MW ดังนั้น ราคาของผู้ผลิต จึงมีค่า 3.60 \$/MWh สำหรับผู้ผลิตรายอื่นใช้หลักการเช่นเดียวกัน เมื่อได้ราคาของผู้ผลิตทุกรายแล้ว จึงนำราคานั้นมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาราคาที่สูงที่สุด และใช้เป็นราคากลางสำหรับการซื้อขายในตลาดกลางต่อไป โดยราคากลางจะถูกประกาศก่อนที่จะมีการซื้อขายกำลังไฟฟ้า และใช้เป็นราคาซื้อขายเฉพาะผู้ซื้อขายผ่านตลาดกลางเท่านั้น

ตารางที่ 2 ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามกำลังไฟฟ้าที่ได้รับจัดสรร

Power (MW)	Bidding Prices (\$/MWh)	Cost (\$/h)
0-16	2.32	42.24
16-32	2.96	104.96
32-48	3.60	144.00
48-64	4.24	291.84
64-80	4.88	416.00

5. ราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Prices: BP)

ราคาซื้อขายของผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี จะตกลงกันตามสัญญาซื้อขาย โดยไม่เกี่ยวข้องกับราคาของตลาดกลาง ดังนั้นในการซื้อขายจะมีเพียงผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีร่วมกันเท่านั้นที่ทราบราคาซื้อขาย ในงานวิจัยนี้จึงใช้ราคาจากตารางราคาของผู้ผลิตเสนอขายให้กับตลาดกลาง โดยรวมกำลังไฟฟ้าจริงที่ผู้ผลิตต้องส่งให้กับผู้ซื้อในการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี P_{ij}^b ดังสมการ (6) จากนั้นจึงนำกำลังไฟฟ้างดงกล่าวไปหารราคาตามช่วงกำลังผลิตตามตารางราคาที่เสนอให้กับตลาดกลางเช่นเดียวกับวิธีหารราคาตลาด ราคาที่ได้นี้จะเรียกว่า Bilateral Prices (BP) ซึ่งจะนำไปคำนวณเฉพาะรายได้ของผู้ผลิตและรายจ่ายของผู้ซื้อที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีเท่านั้น

6. ราคาที่บัส (Nodal Prices)

ผลจากการคำนวณด้วย OPF จะได้ค่า Lagrange multipliers หรือ λ ของแต่ละบัสที่สัมพันธ์กับการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ โดยกำหนด $\lambda_i; i=1, \dots, n$ ให้เป็นราคากำลังไฟฟ้าของแต่ละบัส ในที่นี้เรียกว่า ราคาที่บัส (Nodal Prices) สำหรับใช้คำนวณค่าใช้จ่ายส่งของระบบเท่านั้น

7. การคำนวณค่าสายส่ง

ในการใช้งานสายส่งนั้นผู้ใช้สายส่งต้องรับผิดชอบค่าสายส่งร่วมกัน เนื่องจากระบบจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า ผู้รับกำลังไฟฟ้า และระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในการรับผิดชอบจึงถือว่าผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าและผู้รับกำลังไฟฟ้า ควรแบ่งรับผิดชอบฝ่ายละ 50% และในแต่ละฝ่ายควรแบ่งรับผิดชอบตามสัดส่วนการซื้อขายระหว่างผู้ซื้อขายผ่านตลาดกลางกับผู้ซื้อขายแบบทวิภาคี

การคำนวณค่าสายส่งในที่นี้ใช้ราคาที่บัส จากการคำนวณตามหลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด (Optimal Power Flow) โดยกำหนดให้ผลต่างระหว่างราคาที่บัสของสายส่งคูณกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นนั้น ถือเป็นค่าสายส่ง ดังนี้

$$TTC = \sum_{ij} |\lambda_i - \lambda_j| * P_{ij} \quad (14)$$

โดย TTC คือ ค่าสายส่งระบบ

- λ_i คือ ราคากำลังไฟฟ้าที่บัสส่งของสายส่ง i
 λ_j คือ ราคากำลังไฟฟ้าที่บัสรับของสายส่ง i
 P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง i

เมื่อได้ค่าใช้สายส่งทั้งระบบแล้ว จึงนำมาแบ่งส่วนรับผิดชอบระหว่างผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าและผู้รับกำลังไฟฟ้า ฝ่ายละ 50% ของค่าสายส่งทั้งหมดดังนี้

$$TC_{half} = \frac{TTC}{2} \quad (15)$$

โดย TC_{half} คือ ค่าสายส่งที่ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าและผู้รับกำลังไฟฟ้าควรรับผิดชอบฝ่ายละ 50% ของค่าใช้สายส่งทั้งหมด

7.1 ค่าสายส่งของผู้ผลิต

การผลิตกำลังไฟฟ้าของผู้ผลิตที่ทำธุรกิจซื้อขายแบบทวิภาคี จะประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้ตลาดกลางและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้ผู้ซื้อแบบทวิภาคี ซึ่งทั้งสองส่วนควรแบ่งรับผิดชอบค่าสายส่งตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้กับส่วนนั้น ผู้ผลิตที่ขายแบบทวิภาคีคำนวณค่าสายส่งได้ดังนี้

$$TC_g^b = \left(\frac{P_g^b}{P_g} \right) * TC_{half} \quad (16)$$

$$TC_{gi}^b = \left(\frac{P_{gi}^b}{P_g^b} \right) * TC_g^b \quad (17)$$

โดย TC_g^b คือ ค่าสายส่งของผู้ผลิตที่ผลิตให้กับผู้ซื้อนอกตลาดกลาง

TC_{gi}^b คือ ค่าสายส่งของผู้ผลิตแต่ละรายที่ผลิตให้กับผู้ซื้อนอกตลาดกลาง

เมื่อทราบค่าสายส่งของผู้ผลิตในส่วนของผู้ผลิตที่ขายแบบทวิภาคีแล้ว สามารถคำนวณค่าสายส่งของผู้ผลิตที่ผลิตให้กับส่วนกลางได้ดังนี้

$$TC_g^p = (TC_{half} - TC_g^b) \quad (18)$$

$$TC_{gi}^p = \left(\frac{P_{gi}^p}{P_g^p} \right) * TC_g^p \quad (19)$$

โดย TC_g^p คือ ค่าสายส่งของผู้ผลิตที่ผลิตให้กับตลาดกลาง

TC_{gi}^p คือ ค่าสายส่งของผู้ผลิตแต่ละรายที่ผลิตให้กับตลาดกลาง

ดังนั้นค่าใช้จ่ายของผู้ผลิตแต่ละรายจะประกอบด้วยค่าสายส่งที่เกิดจากการผลิตให้กับตลาดกลางรวมกับค่าสายส่งที่เกิดจากการผลิตให้กับการซื้อขายแบบทวิภาคีดังสมการ

$$TC_{gi} = TC_{gi}^p + TC_{gi}^b \quad (20)$$

โดย TC_{gi} คือ ค่าสายส่งของผู้ผลิต

7.2 ค่าสายส่งของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้า

ค่าสายส่งของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าหรือโหลดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นเดียวกับผู้ผลิต คือ ส่วนที่ซื้อจากตลาดกลาง และส่วนที่ซื้อแบบทวิภาคี ดังนี้

$$TC_d^b = \left(\frac{P_d^b}{P_d} \right) * TC_{half} \quad (21)$$

$$TC_{dj}^b = \left(\frac{P_{dj}^b}{P_d^b} \right) * TC_d^b \quad (22)$$

โดย TC_d^b คือ ค่าสายส่งของโหลดที่ซื้อขายนอกตลาดกลาง

TC_{dj}^b คือ ค่าสายส่งของโหลดแต่ละรายที่ซื้อขายนอกตลาดกลาง

เมื่อทราบค่าสายส่งของโหลดในส่วนของกรซื้อขายนอกตลาดกลางแล้ว สามารถคำนวณค่าสายส่งของโหลดที่ซื้อจากตลาดกลางได้ดังนี้

$$TC_d^p = (TC_{half} - TC_d^b) \quad (23)$$

$$TC_{dj}^p = \left(\frac{P_{dj}^p}{P_d^p} \right) * TC_d^p \quad (24)$$

โดย TC_d^p คือ ค่าสายส่งของโหลดที่ซื้อจากตลาดกลาง

TC_{dj}^p คือ ค่าสายส่งของโหลดแต่ละเครื่องที่ซื้อจากตลาดกลาง

ดังนั้นค่าใช้จ่ายของโหลดแต่ละรายจะประกอบด้วยค่าใช้จ่ายสายส่งที่เกิดจากการซื้อผ่านตลาดกลางรวมกับค่าใช้จ่ายสายส่งที่เกิดจากการซื้อแบบทวิภาคี ดังสมการ

$$TC_{di} = TC_{di}^p + TC_{di}^b \quad (25)$$

โดย TC_{di} คือ ค่าใช้จ่ายสายส่งของโหลดแต่ละราย

8. การคำนวณรายได้ของผู้ผลิตและรายจ่ายของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้า

8.1 รายได้ของผู้ผลิต

รายได้ของผู้ผลิตมาจากการขายกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลางและผู้ซื้อแบบทวิภาคี เมื่อหักค่าใช้จ่ายสายส่งแล้วถือเป็นรายได้สุทธิ ดังสมการ

$$R_{gi} = R_{gi}^p + R_{gi}^b - TC_{gi} \quad (26)$$

โดย R_{gi} คือ รายได้สุทธิของผู้ผลิตแต่ละราย

R_{gi}^p คือ รายได้ที่ผู้ผลิตแต่ละรายจะได้รับจากการผลิตให้กับตลาดกลาง

R_{gi}^b คือ รายได้ของผู้ผลิตแต่ละรายที่เกิดจากการซื้อขายแบบทวิภาคี

โดยรายได้จากการขายให้กับตลาดกลาง จะใช้ราคากลาง (Market Clearing Price: MCP) ในการคำนวณ ดังนี้

$$R_{gi}^p = P_{gi}^p * MCP \quad (27)$$

สำหรับรายได้ของผู้ผลิตที่เกิดจากการซื้อขายนอกตลาดกลาง จะใช้ราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Price: BP) ดังนี้

$$R_{gi}^b = P_{gi}^b * BP_i \quad (28)$$

8.2 รายจ่ายของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้า

รายจ่ายของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าหรือโหลด เกิดจากการซื้อกำลังไฟฟ้าจากตลาดกลางและแบบทวิภาคี เมื่อนำมารวมกับค่าสายส่งแล้ว จะถือเป็นรายจ่ายสุทธิ ดังสมการ

$$E_{dj} = E_{dj}^p + E_{dj}^b + TC_{dj} \quad (29)$$

โดย E_{dj} คือ รายจ่ายสุทธิของโหลดแต่ละราย

E_{dj}^p คือ รายจ่ายที่โหลดแต่ละรายจะต้องจ่ายให้กับตลาดกลาง

E_{dj}^b คือ รายจ่ายของโหลดแต่ละรายที่เกิดจากการซื้อขายนอกตลาดกลาง

โดยรายจ่ายจากการซื้อผ่านตลาดกลางนั้น จะใช้ราคากลาง (Market Clearing Price: MCP) ในการคำนวณ ดังนี้

$$E_{dj}^p = P_{dj}^p * MCP \quad (30)$$

สำหรับรายจ่ายของโหลดที่เกิดจากการซื้อขายนอกตลาดกลาง จะใช้ราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Price: BP) ดังนี้

$$E_{dj}^b = \sum_{i=1}^n GD_{ij} * BP_i \quad (31)$$

ผลและวิจารณ์

ผล

การศึกษาได้ใช้โปรแกรม MATPOWER ที่เพิ่มฟังก์ชันในส่วนคำนวณการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ระบบที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง ติดตั้งที่บัส 1, 2, 22, 27, 23, และ 13, เชื่อมกับสายส่ง 41 เส้น เส้นโค้งราคา (Cost curve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคำนวณจากราคาที่ผู้ผลิตเสนอขายแก่ตลาดกลางดังตารางที่ 3 และมีโหลดของระบบ 189.20 MW

ตารางที่ 3 เส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Generator Bus	P_g^{\max} (MW)	a	b	c
1	80	0.02	2	0
2	80	0.0175	1.75	0
13	40	0.025	3	0
22	50	0.0625	1	0
23	30	0.025	3	0
27	55	0.00384	3.25	0

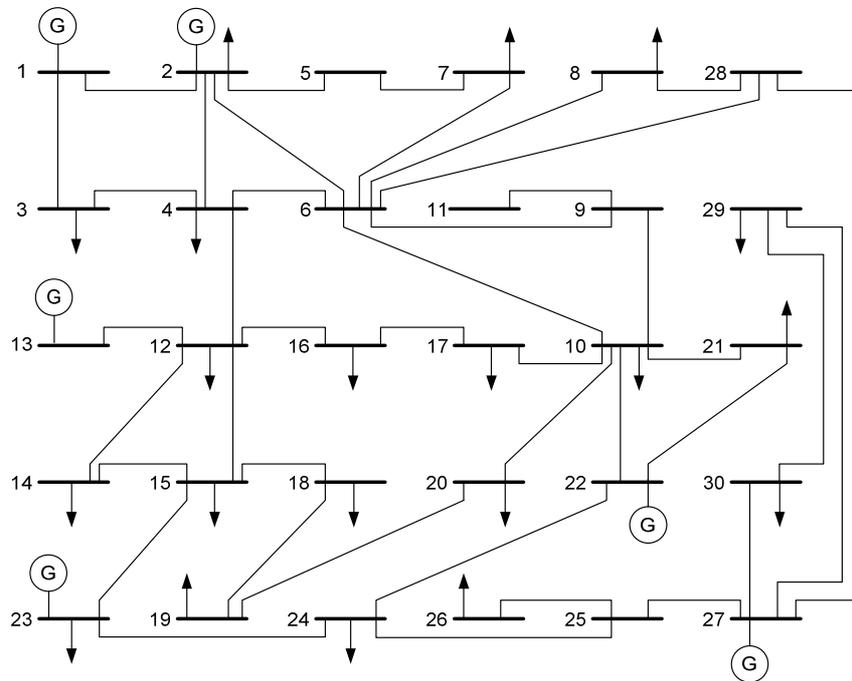
$P_g^{\min} = 0$ for all generators

ในการวิจัยได้แยกเป็น 3 กรณีดังนี้

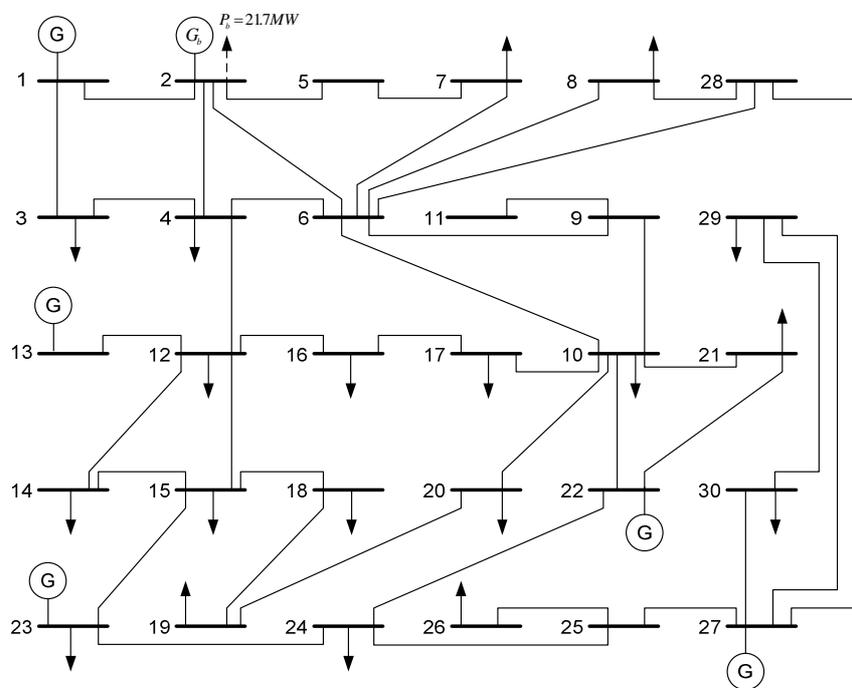
กรณี 1 ไม่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ผู้ซื้อและผู้ขายทำการซื้อขายผ่านตลาดกลางเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 5

กรณี 2 มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี โดยผู้ซื้อที่บัส 2 ซื้อกำลังไฟฟ้าที่ต้องการทั้งหมดจากผู้ผลิตที่บัส 2 จำนวน 21.7 MW ดังแสดงในภาพที่ 6

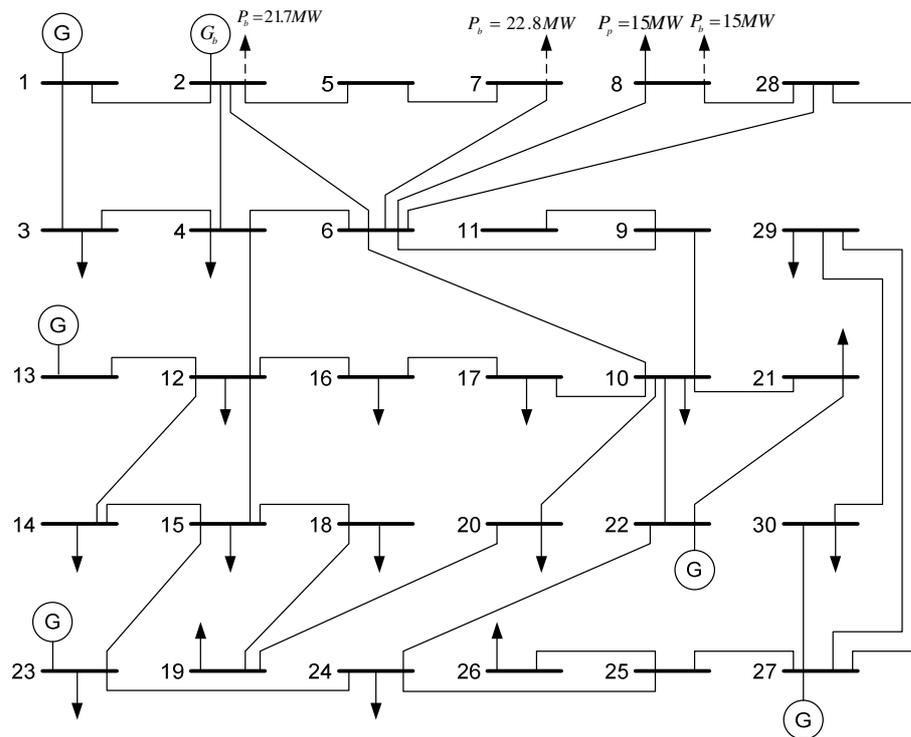
กรณี 3 มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีหลายราย ได้แก่ ผู้ซื้อที่บัส 2, 7, และ 8 ซื้อกำลังไฟฟ้าโดยตรงจากผู้ผลิตที่บัส 2 จำนวน 21.7 MW, 22.8 MW, และ 15 MW ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าจากการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีทั้งหมด คือ 59.5 MW ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 5 ระบบ 30 บัส สำหรับศึกษากรณี 1



ภาพที่ 6 ระบบ 30 บัส สำหรับศึกษากรณี 2



ภาพที่ 7 ระบบ 30 บัส สำหรับศึกษากรณี 3

หลังจากคำนวณด้วย OPF ผลที่ได้ได้แก่ กำลังการผลิต การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ข้อจำกัดของระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ค่าใช้จ่ายของระบบ และราคาที่บัส โดยค่าสายส่งจะคำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งกับราคาที่บัส ส่วนข้อมูลกำลังการผลิตที่ได้รับจัดสรรจะนำไปหาราคากลาง เพื่อคำนวณราคาซื้อขายในตลาดกลาง กรณีบัสใดมีการซื้อขายแบบทวิภาคี จะเพิ่มการหาราคาสำหรับการซื้อขายแบบทวิภาคีโดยเฉพาะ เมื่อนำไปรวมกับค่าสายส่ง จึงจะเป็นรายได้หรือรายจ่ายสุทธิ โดยมีผลดังนี้

1. กำลังการผลิต

จากตารางที่ 4 ซึ่งให้เห็นผลการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตที่บัส 2 เนื่องจากในกรณี 1 บัส 2 ได้รับการจัดสรรการผลิตมากที่สุด คือ 55.4 MW ดังนั้น 2 กรณีหลังจึงกำหนดให้การซื้อขายนอกตลาด ซื้อจากผู้ผลิตที่บัส 2 เนื่องจากมีราคาต่ำที่สุด โดยกรณี 2 ผู้ผลิตที่บัส 2 ขายไฟนอกตลาดแต่กำลังการผลิตรวม ยังไม่เกินจุดที่ได้รับการจัดสรรในกรณี 1 ส่วนกรณี 3 โหลดซื้อกำลังไฟฟ้าจากบัส 2 จนทำให้กำลังรวมของผู้ผลิตที่บัส 2 เป็น 59.50 MW ซึ่งเกินจุดที่ได้รับการจัดสรรในกรณี 1

ตารางที่ 4 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัส	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	P_g^p	P_g^b	P_g^p	P_g^b	P_g^p	P_g^b
1	41.54	0	41.54	0	40.14	0
2	55.40	0	33.70	21.70	0	59.50
13	16.20	0	16.20	0	15.33	0
22	22.74	0	22.74	0	22.38	0
23	16.27	0	16.27	0	15.73	0
27	39.91	0	39.91	0	39.10	0
รวม	192.1	0	170.4	21.70	132.7	59.50

2. กำลังไฟฟ้าของโหลด

ตารางที่ 5 แสดงกำลังไฟฟ้าของโหลด ที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าโหลดได้รับกำลังไฟฟ้าตามที่กำหนดในแต่ละกรณีศึกษา เช่น ที่บัส 2 ทำสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีในกรณี 2 และ 3 กำลังไฟฟ้าที่ได้รับ จึงได้รับการซื้อขายนอกตลาดกลางเท่านั้น ส่วนบัส 7 และบัส 8 นั้นมีเพียงกรณี 3 ที่ทำสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่บัส 7 จึงได้รับจากนอกตลาดกลางเท่านั้น ส่วนบัส 8 กำลังไฟฟ้าที่ได้รับจะมาจากทั้งตลาดกลางและนอกตลาดกลาง และแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ซื้อนอกตลาดกลางได้รับครบตามที่ได้ทำสัญญาซื้อขายแบบคงกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายแบบทวิภาคีไว้ (Firm)

ตารางที่ 5 กำลังไฟฟ้าของโหลด

ปี	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	P_d^p	P_d^b	P_d^p	P_d^b	P_d^p	P_d^b
2	21.7	0	0	21.7	0	21.7
3	2.4	0	2.4	0	2.4	0
4	7.6	0	7.6	0	7.6	0
7	22.8	0	22.8	0	0	22.8
8	30.0	0	30.0	0	15.0	15.0
10	5.8	0	5.8	0	5.8	0
12	11.2	0	11.2	0	11.2	0
14	6.2	0	6.2	0	6.2	0
15	8.2	0	8.2	0	8.2	0
16	3.5	0	3.5	0	3.5	0
17	9.0	0	9.0	0	9.0	0
18	3.2	0	3.2	0	3.2	0
19	9.5	0	9.5	0	9.5	0
20	2.2	0	2.2	0	2.2	0
21	17.5	0	17.5	0	17.5	0
23	3.2	0	3.2	0	3.2	0
24	8.7	0	8.7	0	8.7	0
26	3.5	0	3.5	0	3.5	0
29	2.4	0	2.4	0	2.4	0
30	10.6	0	10.6	0	10.6	0

3. การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

เนื่องจากการซื้อขายแบบทวิภาคี เป็นการซื้อกับผู้ผลิตที่บัส 2 ดังนั้นการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมกับบัส 2 จึงมีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังการผลิตที่บัส 2 อย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบกรณี 2 กับกรณี 1 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัส 2 นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนกรณี 3 กำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส 2 เพิ่มขึ้นเนื่องจากผู้ผลิตที่บัส 2 ต้องผลิตกำลังไฟฟ้ามามากขึ้น เพื่อให้สามารถจ่ายให้กับการซื้อขายนอกตลาดกลาง ตามที่ตกลงซื้อขายกันไว้ในกรณีนี้ผู้ดูแลระบบต้องวิเคราะห์ผลที่จะกระทบต่อสายส่งที่เชื่อมกับบัส 2 เพื่อป้องกันไม่ให้อำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางไฟฟ้าของระบบได้

ตารางที่ 6 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

บัส	ส่ง	รับ	กรณี 1			กรณี 2			กรณี 3		
			P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)
1	2		21.04	-2.34	21.17	21.04	-2.34	21.17	19.28	-2.49	19.43
1	3		20.50	-3.10	20.73	20.50	-3.10	20.73	20.86	-4.16	21.27
2	4		18.63	-5.85	19.53	18.63	-5.85	19.53	19.60	-7.23	20.89
3	4		17.88	-3.22	18.16	17.88	-3.22	18.16	18.23	-4.35	18.74
2	5		14.36	-0.96	14.38	14.36	-0.96	14.38	14.78	-1.27	14.84
2	6		21.66	-4.21	22.07	21.66	-4.21	22.07	22.61	-5.57	23.29
4	6		17.58	5.68	18.48	17.58	5.68	18.48	17.69	5.33	18.48
5	7		14.25	0.96	14.28	14.25	0.96	14.28	14.67	0.32	14.67
6	7		8.70	8.46	12.14	8.70	8.46	12.14	8.30	9.14	12.34
6	8		23.82	21.37	32.00	23.82	21.37	32.00	23.98	21.18	32.00
6	9		7.27	-8.27	11.01	7.27	-8.27	11.01	7.68	-9.26	12.03
6	10		4.15	-4.73	6.29	4.15	-4.73	6.29	4.39	-5.29	6.88
9	11		0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10		7.27	-8.54	11.21	7.27	-8.54	11.21	7.68	-9.59	12.29
4	12		11.06	-15.23	18.82	11.06	-15.23	18.82	12.23	-17.54	21.38

ตารางที่ 6 (ต่อ)

บัส ส่ง รับ	กรณี 1			กรณี 2			กรณี 3		
	P (MW)	Q (MVAr)	S (MVA)	P (MW)	Q (MVAr)	S (MVA)	P (MW)	Q (MVAr)	S (MVA)
13 12	16.20	35.92	39.41	16.20	35.92	39.41	15.33	39.90	42.74
12 14	4.68	2.08	5.12	4.68	2.08	5.12	4.76	2.16	5.23
12 15	6.07	3.18	6.85	6.07	3.18	6.85	6.32	3.52	7.23
12 16	5.31	5.04	7.32	5.31	5.04	7.32	5.27	5.70	7.76
15 14	1.55	-0.41	1.60	1.55	-0.41	1.60	1.48	-0.48	1.55
16 17	1.76	3.14	3.60	1.76	3.14	3.60	1.72	3.78	4.15
15 18	7.20	3.75	8.12	7.20	3.75	8.12	7.15	4.15	8.27
18 19	3.93	2.70	4.77	3.93	2.70	4.77	3.88	3.10	4.96
20 19	5.59	0.75	5.64	5.59	0.75	5.64	5.65	0.36	5.66
10 20	7.85	1.58	8.01	7.85	1.58	8.01	7.91	1.19	7.99
10 17	7.27	2.73	7.76	7.27	2.73	7.76	7.31	2.10	7.61
21 10	4.47	11.68	12.50	4.47	11.68	12.50	4.13	12.09	12.78
22 10	5.13	8.54	9.96	5.13	8.54	9.96	4.93	8.79	10.08
22 21	22.07	23.07	31.93	22.07	23.07	31.93	21.73	23.49	32.00
23 15	11.04	2.96	11.43	11.04	2.96	11.43	10.65	2.94	11.05
24 22	4.49	2.54	5.16	4.49	2.54	5.16	4.30	-2.02	4.75
23 24	2.03	2.39	3.13	2.03	2.39	3.13	1.87	2.82	3.38
25 24	11.41	2.61	11.62	11.41	2.61	11.62	11.38	2.26	11.60
25 26	3.54	2.36	4.26	3.54	2.36	4.26	3.54	2.36	4.25
27 25	15.20	4.99	16.00	15.20	4.99	16.00	15.17	5.09	16.00
27 28	11.45	23.48	26.12	11.45	23.48	26.12	10.67	24.64	26.85
27 29	6.16	1.65	6.37	6.16	1.65	6.37	6.16	1.65	6.37
27 30	7.10	1.63	7.29	7.10	1.63	7.29	7.10	1.63	7.29
29 30	3.68	0.60	3.73	3.68	0.60	3.73	3.68	0.60	3.73

ตารางที่ 6 (ต่อ)

บัส	รับ	กรณี 1			กรณี 2			กรณี 3		
		P	Q	S	P	Q	S	P	Q	S
		(MW)	(MVA _r)	(MVA)	(MW)	(MVA _r)	(MVA)	(MW)	(MVA _r)	(MVA)
28	8	6.36	7.41	11.03	6.36	7.41	11.03	6.20	7.62	9.82
28	6	5.09	13.68	15.35	5.09	13.68	15.35	4.48	14.50	15.17

4. ข้อจำกัดของระบบ

ตารางที่ 7 แสดงแรงดันเต็มพิกัดที่บัส 29 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า แรงดันที่บัส 29 มีขนาดเต็มพิกัดทั้ง 3 กรณี

ตารางที่ 7 แรงดันพิกัดในระบบ

บัส	$V(pu)$		
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
29	1.05	1.05	1.05

ตารางที่ 8 แสดงการใช้สายส่งเต็มพิกัด พบว่าสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 6 กับบัส 8 และบัส 25 กับบัส 27 มีการใช้สายส่งเต็มพิกัดทั้ง 3 กรณี เฉพาะกรณี 3 เท่านั้นที่สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 21 และบัส 22 มีกำลังไฟฟ้าไหลเพิ่มมากขึ้นจนเต็มพิกัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลจากการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งบางเส้นเพิ่มขึ้นได้

ตารางที่ 8 สายส่งที่ใช้งานเต็มพิกัดในระบบ

บัส		S(MVA)			
ต้นทาง	ปลายทาง	พิกัด	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
6	8	32.00	32.00	32.00	32.00
27	25	16.00	16.00	16.00	16.00
22	21	32.00	31.92	31.92	32.00

5. กำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าใช้จ่ายของระบบ

จากการวิจัยพบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าใช้จ่ายของระบบ ในกรณี 1 และ 2 มีค่าเท่ากัน แต่มีค่าสูงขึ้นในกรณี 3 โดยมีความสัมพันธ์กับการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งหากการไหลของกำลังไฟฟ้ามีมากขึ้น ย่อมทำให้เกิดการสูญเสียในระบบมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 9 และกำลังไฟฟ้าที่ไหลมากขึ้นนั้นย่อมเป็นผลมาจากระดับการผลิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่ต้องผลิตให้กับผู้ซื้อแบบทวิภาคนั้นเอง เมื่อระดับการผลิตเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของระบบเพิ่มขึ้นอย่างเลี่ยงไม่ได้

ตารางที่ 9 กำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าใช้จ่ายจากการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบ

	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)	2.86	2.86	2.94
ค่าใช้จ่ายจากการผลิต กำลังไฟฟ้า (\$/h)	576.89	576.89	577.31

6. ราคาตลาด (Market Clearing Prices)

ตารางที่ 10 แสดงราคาตลาดของระบบ ซึ่งทั้ง 3 กรณีมีค่าเท่ากัน คือ 4.125 \$/MWh สำหรับกรณี 3 พบว่าแม้การไหลของกำลังไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนไปจากการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดของกรณี 1 และกรณี 2 แต่ราคาตลาดยังคงมีค่าเท่ากับทั้ง 2 กรณี ซึ่งเป็นผลจากระดับการผลิตที่ได้รับจัดสรรในกรณี 3 มีการเปลี่ยนแปลงจากกรณี 1 และกรณี 2 ไม่มากนัก ทำให้ราคากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้รับจัดสรรของกรณี 3 ยังคงอยู่ในช่วงเดียวกับราคากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้รับจัดสรรของกรณี 1 และกรณี 2

ตารางที่ 10 ราคาตลาด

ราคาตลาด (\$/MWh)		
กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
4.125	4.125	4.125

7. ราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Prices: BP)

ตารางที่ 11 แสดงราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี โดยกรณี 1 ไม่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ราคาจึงเป็น 0 ส่วนกรณี 2 และ 3 มีราคาแตกต่างกัน เนื่องจากกรณี 3 มีการผลิตเพื่อขายให้กับผู้ซื้อแบบทวิภาคีจำนวน 59.5 MW ซึ่งมากกว่ากรณี 2 ที่มีการผลิตเพื่อขายให้ผู้ซื้อแบบทวิภาคีเพียง 22.7 MW

ตารางที่ 11 ราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า

บัส	ราคาสำหรับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี (\$/MWh)		
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
2	0	2.59	3.71

8. ราคาที่บัส (Nodal Prices)

จากผลของ OPF ตารางที่ 12 แสดงให้เห็นว่าราคาที่บัส ในกรณี 1 และ 2 มีค่าเท่ากัน ส่วนกรณี 3 พบว่าค่าส่วน ใหญ่มีแนวโน้มลดลง แต่มีผลต่างระหว่างราคาที่บัสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณี 1 และ 2 ราคาที่บัสที่มีผลต่างระหว่างบัสมากขึ้นนั้น เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตของผู้ผลิตที่บัส 2 เพื่อให้เป็นไปตามกำลังผลิตที่ตกลงกับผู้ซื้อแบบทวิภาคี ซึ่งเกินกว่าระดับที่ได้รับจัดสรรในระบบที่ยังไม่มีการซื้อขายแบบทวิภาคี ผลต่างที่มากขึ้นนี้ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายสายส่งโดยตรง เพราะค่าใช้จ่ายสายส่งเป็นการนำราคาที่บัสมาใช้คำนวณ

ตารางที่ 12 ราคาที่บัสของระบบ

บัส	ราคาที่บัส (\$/MWh)		
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
1	3.662	3.662	3.606
2	3.689	3.689	3.630
3	3.754	3.754	3.700
4	3.771	3.771	3.716
5	3.744	3.744	3.686
6	3.779	3.779	3.723
7	3.801	3.801	3.744
8	5.382	5.382	5.740
9	3.823	3.823	3.777
10	3.846	3.846	3.806
11	3.823	3.823	3.777
12	3.810	3.810	3.766
13	3.810	3.810	3.766
14	3.868	3.868	3.826
15	3.856	3.856	3.818
16	3.849	3.849	3.806
17	3.862	3.862	3.821

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ปี	ราคาไฟฟ้า (\$/MWh)		
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
18	3.911	3.911	3.872
19	3.926	3.926	3.886
20	3.910	3.910	3.870
21	3.854	3.854	3.825
22	3.843	3.843	3.798
23	3.813	3.813	3.786
24	3.884	3.884	3.867
25	3.932	3.932	3.970
26	3.999	3.999	4.038
27	3.916	3.916	3.902
28	4.106	4.106	4.139
29	3.966	3.966	3.948
30	4.051	4.051	4.034

9. ค่าสายส่งของทั้งระบบ (Total Transmission Costs: TTC)

ตารางที่ 13 แสดงค่าสายส่งของทั้งระบบ จากการศึกษาพบว่า กรณี 1 และ 2 มีค่าสายส่งเท่ากัน เพราะแม้กรณี 2 จะมีการซื้อขายแบบทวิภาคี แต่กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าสายส่งยังมีค่าคงเดิม ส่วนกรณี 3 มีการเปลี่ยนแปลงของการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ส่งผลให้ค่าสายส่งเพิ่มมากขึ้นจากกรณี 1 และกรณี 2

ตารางที่ 13 ค่าสายส่งของทั้งระบบ

ค่าสายส่ง (\$/h)		
กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
65.19	65.19	80.27

10. ค่าสายส่งของผู้ผลิต

ค่าสายส่งเป็นผลคำนวณจากราคาที่บัสที่ได้จากวิธีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ดังสมการ (16) – (20) จากการศึกษาพบว่าค่าสายส่งของผู้ผลิตแต่ละรายในกรณี 1 มีค่าเท่ากับกรณี 2 ซึ่งเป็นผลจากการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้ราคาที่บัสมีค่าเท่ากันด้วย ซึ่งเป็นการเหมาะสมแล้ว เพราะแม้จะมีการทำการซื้อขายนอกตลาดในกรณี 2 แต่กำลังการผลิตของผู้ผลิตที่ขายให้ตลาดกลางนั้นมีค่าเท่ากับกรณี 1 ประกอบกับการไหลของกำลังไฟฟ้ายังมีค่าเท่าเดิม จึงถือว่าการซื้อขายนอกตลาดกลางในกรณี 2 ไม่เกิดผลกระทบต่อการใช้งานสายส่งและระบบโดยรวม จึงเป็นการสมควรที่ค่าสายส่งของผู้ซื้อขายนอกตลาดกลางยังคงจ่ายเท่ากรณี 1

ส่วนในกรณี 3 ค่าสายส่งเพิ่มขึ้นทั้งระบบ ทั้งนี้เกิดจากการผลิตที่ระดับข้อจำกัดของผู้ผลิต 2 ส่งผลให้ราคาที่บัสมีความแตกต่างมากขึ้น ทำให้ค่าสายส่งเพิ่มขึ้น เป็นการชี้ให้เห็นว่าหากบัส 2 ทำการซื้อขายนอกตลาดแล้วทำให้ระบบติดข้อจำกัดใน OPF เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดการใช้สายส่งเต็มพิกัดและค่าสายส่งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นยังส่งผลให้ค่าสายส่งของผู้ผลิตรายอื่นเพิ่มตามไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าสายส่งของผู้ผลิต (\$/h)

บัส	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	TC_g^p	TC_g^b	TC_g^p	TC_g^b	TC_g^p	TC_g^b
1	7.051	0	7.051	0	8.383	0
2	9.403	0	5.720	3.683	0	12.43
13	2.749	0	2.750	0	3.201	0
22	3.859	0	3.860	0	4.675	0
23	2.761	0	2.761	0	3.285	0
27	6.773	0	6.774	0	8.165	0

11. ค่าสายส่งของผู้ซื้อ

ค่าใช้จ่ายสายส่งของผู้ซื้อหรือ โหลด แสดงในตารางที่ 15 มีการคำนวณดังสมการ (21) – (25) ซึ่งมีการแยกจ่ายเฉพาะกรณีที่มีการซื้อแบบทวีภาคี สำหรับกรณี 2 ค่าใช้จ่ายสายส่งยังคงมีค่าเท่ากับกรณี 1 ส่วนกรณี 3 พบว่าค่าสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นทุกบัส แสดงให้เห็นว่าเมื่อโหลดทำการซื้อขายนอกตลาดกลาง 100% ดังในกรณี 3 นั้นจะได้กำลังไฟฟ้าที่มีราคาถูกต้องจริง แต่ต้องจ่ายค่าสายส่งมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ผู้ซื้อขายนอกตลาดกลางลดกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายลง ดังนั้นค่าใช้จ่ายสายส่งที่คำนวณจากราคาที่บัสจึงเป็นกลไกที่ผู้ดูแลระบบสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมๆ กับสนับสนุนการลงทุนจากผู้ร่วมใช้สายส่งด้วย

ตารางที่ 15 ค่าสายส่งของผู้ซื้อ (\$/h)

บัส	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	TC_d^p	TC_d^b	TC_d^p	TC_d^b	TC_d^p	TC_d^b
2	3.739	0	0	3.739	0	4.603
3	0.413	0	0.414	0	0.509	0
4	1.309	0	1.309	0	1.612	0
7	3.928	0	3.928	0	0	4.837
8	5.169	0	5.169	0	3.182	3.182

ตารางที่ 15 (ต่อ)

ปี	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	TC_d^p	TC_d^b	TC_d^p	TC_d^b	TC_d^p	TC_d^b
10	0.999	0	0.999	0	1.230	0
12	1.930	0	1.930	0	2.376	0
14	1.068	0	1.068	0	1.315	0
15	1.413	0	1.413	0	1.739	0
16	0.603	0	0.603	0	0.742	0
17	1.551	0	1.551	0	1.909	0
18	0.551	0	0.551	0	0.679	0
19	1.637	0	1.637	0	2.015	0
20	0.379	0	0.379	0	0.467	0
21	3.015	0	3.015	0	3.712	0
23	0.551	0	0.551	0	0.679	0
24	1.499	0	1.499	0	1.846	0
26	0.603	0	0.603	0	0.742	0
29	0.413	0	0.414	0	0.509	0
30	1.826	0	1.826	0	2.249	0

12. รายได้ของผู้ผลิต

เหตุผลที่โหนดซื้อกำลังไฟฟ้านอกตลาดกลางจากผู้ผลิตที่บัส 2 นั้น คงเพราะคาดว่าจะมีราคาที่ถูกกว่าราคากลาง ซึ่งผลการวิจัยดังสมการ (26) – (28) พบว่าเป็นเช่นนั้นจริง รายได้ของผู้ผลิตแสดงในตารางที่ 16 ในกรณี 2 เฉพาะผู้ผลิตที่บัส 2 เท่านั้นที่มีรายได้ลดลงจากกรณีแรก โดยผู้ผลิตรายอื่นมีรายได้จากกรณี 2 เท่ากับกรณี 1 เพราะมีกำลังผลิตและราคากลางเท่าเดิม ส่วนกรณี 3 พบว่ารายได้ของผู้ผลิตที่บัส 2 มีค่ามากกว่ากรณี 2 แต่อย่างน้อยกว่ากรณีแรก ทั้งนี้ที่ผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่า อันเป็นผลจากราคาที่ขายให้กับผู้ซื้อแบบทวิภาคีมีราคาต่ำกว่าราคากลาง ทำให้ผู้ผลิตต้องสูญเสียรายได้บางส่วนจากการซื้อขายแบบทวิภาคี ส่วนรายได้ของผู้ผลิตรายอื่นนั้นพบว่าการกรณี 1 และกรณี 2 มีค่าเท่าเดิม ยกเว้นกรณี 3 ที่มีรายได้ลดลง อันเป็นผลจากค่าใช้จ่ายสายส่งที่สูงขึ้นเนื่องจากการซื้อขายแบบทวิภาคี

ตารางที่ 16 รายได้ของผู้ผลิต (\$/h)

บัส	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	R_g^p	R_g^b	R_g^p	R_g^b	R_g^p	R_g^b
1	164.31	0	164.31	0	157.19	0
2	219.13	0	133.30	52.52	0	208.32
22	89.94	0	89.94	0	87.65	0
27	157.85	0	157.85	0	153.11	0
23	64.33	0	64.33	0	61.59	0
13	64.08	0	64.08	0	60.02	0
รวม	759.64	0	673.81	52.52	519.56	208.32

13. รายจ่ายของผู้ซื้อ

ข้อมูลในตารางที่ 17 แสดงให้เห็นข้อมูลรายจ่ายของผู้ซื้อหรือโหลด จากการคำนวณของสมการ (29) – (31) ในกรณี 2 มีเพียงบัส 2 เท่านั้นที่ทำการซื้อขายนอกตลาดและมีรายจ่ายลดลง ในกรณีที่ 3 บัส 2, 7, และ 8 ทำการซื้อขายนอกตลาดกลาง ถึงแม้บัส 2 ต้องจ่ายมากกว่ากรณีที่ 2 แต่ก็ยังจ่ายน้อยกว่ากรณีแรก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสำหรับโหลดแล้ว เมื่อทำการซื้อขายนอกตลาดกลางจะทำให้ลดรายจ่ายลงได้ เพราะราคาที่ซื้อนอกตลาดกลางมีราคาต่ำกว่าราคากลาง แต่ก็ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบเปลี่ยนซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการใช้งานสายส่งเต็มพิกัดทำให้ค่าสายส่งสูงขึ้น ผู้ดูแลระบบจึงต้องมีกลไกเข้ามาควบคุม การซื้อขายนอกตลาดให้มีความสมดุล กลไกดังกล่าวก็คือการเก็บค่าสายส่ง

ตารางที่ 17 รายจ่ายของผู้ซื้อ (\$/h)

บัส	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	R_d^p	R_d^b	R_d^p	R_d^b	R_d^p	R_d^b
2	93.25	0	0	59.89	0	85.11
3	10.31	0	10.31	0	10.31	0
4	32.66	0	32.66	0	32.66	0
7	97.98	0	97.98	0	0	89.42
8	128.92	0	128.92	0	65.06	58.83
10	24.92	0	24.92	0	25.16	0
12	48.13	0	48.13	0	48.58	0
14	26.64	0	26.64	0	26.89	0
15	35.24	0	35.24	0	35.56	0
16	15.04	0	15.04	0	15.18	0
17	38.68	0	38.68	0	39.03	0
18	13.75	0	13.75	0	13.88	0
19	40.82	0	40.82	0	41.20	0
20	9.45	0	9.45	0	9.54	0
21	72.20	0	72.20	0	75.90	0

ตารางที่ 17 (ต่อ)

ปี	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	R_d^p	R_d^b	R_d^p	R_d^b	R_d^p	R_d^b
23	13.75	0	13.75	0	13.88	0
24	37.39	0	37.39	0	37.73	0
26	15.04	0	15.04	0	15.18	0
29	10.31	0	10.31	0	10.41	0
30	45.55	0	45.55	0	45.97	0

วิจารณ์

จากการศึกษาพบว่าผู้ผลิตที่ทำการซื้อขายแบบทวิภาคี อาจมีรายได้ลดลงหรือสูงขึ้นก็ได้ แต่ในการศึกษาพบว่ารายได้ของผู้ผลิตลดลง เนื่องจากราคาของกำลังไฟฟ้าที่ขายให้กับผู้ซื้อแบบทวิภาคีนั้น มีราคาถูกลงกว่าราคากลางของตลาดกลาง ถึงแม้จะผลิตเพื่อขายให้กับผู้ซื้อแบบทวิภาคีมากขึ้น กลับพบว่ารายรับยังคงต่ำกว่ารายรับที่มาจากการขายให้กับตลาดกลางเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้รายรับของผู้ผลิตที่ขายให้ผู้ซื้อแบบทวิภาคีจะลดลงแล้ว ยังทำให้เกิดการใช้สายส่งเต็มพิกัด และผู้ผลิตรายอื่นยังต้องแบกรับค่าสายส่งที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นผู้ผลิตจึงควรพิจารณาถึงผลกระทบให้รอบคอบก่อนตัดสินใจทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี

สำหรับโหลดแล้ว พบว่าการซื้อกำลังไฟฟ้าที่ไม่ผ่านตลาดกลาง อาจได้ราคาของกำลังไฟฟ้าถูกลง แต่ต้องพบกับค่าสายส่งที่สูงขึ้น เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ที่ทำให้ผลต่างของราคาที่ใช้ของสายส่งแต่ละเส้นมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายของระบบ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นค่าสายส่งจึงเป็นมาตรการหนึ่งที่ผู้ดูแลระบบสามารถนำมาควบคุมให้ระบบมีความคุ้มค่าแก่การลงทุนและคงประสิทธิภาพให้มากที่สุด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบและค่าสายส่ง โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด (Optimal Power Flow) พร้อมเสนอการคิดราคาสายส่งด้วยราคาบัส โดยคำนวณและเปรียบเทียบค่าสายส่ง รายได้ของผู้ผลิต และรายจ่ายของผู้รับซื้อกำลังไฟฟ้า ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในระบบ IEEE 30 บัส การศึกษาใช้โปรแกรม MATPOWER ที่เพิ่มฟังก์ชันในส่วนคำนวณการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี และได้ศึกษา 3 กรณี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ส่งผลให้การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบและราคาบัสมีการเปลี่ยนแปลงหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตที่ระดับข้อจำกัด ซึ่งทำให้ค่าสายส่งเพิ่มขึ้นทั้งระบบ ผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าผ่านธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีอาจได้ราคาที่ถูกลง แต่ต้องประสบกับราคาสายส่งที่เพิ่มขึ้นหากการชื้อขายนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดของระบบ นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการคิดราคาสายส่งด้วยราคาบัสอาจสามารถใช้เป็นเครื่องมือให้ผู้ดูแลระบบจัดการการใช้สายส่งได้ เพราะเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบจากค่าที่ดีที่สุดเป็นค่าอื่น อาจส่งผลกระทบต่อราคาบัสในทางที่ทำให้ค่าสายส่งเพิ่มขึ้น ทำให้ผู้ชื้อขายนอกตลาดกลางได้รับผลกระทบด้วยเช่นกัน และอาจปรับลดการชื้อขายนอกตลาดกลางทำให้สถานะของระบบกลับเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จาก OPF อีกครั้ง

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากับระบบที่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี เพื่อดูผลกระทบต่อระบบทั้งการไหลของกำลังไฟฟ้าและรายรับรายจ่ายของผู้ทำธุรกิจในระบบ โดยนำกลไกราคาควบคุมการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีผ่านการคิดค่าใช้สายส่ง เพื่อลดผลกระทบที่อาจเป็นอันตรายต่อระบบ โดยการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีเป็นแบบไหลคองที่ ดังนั้นงานวิจัยต่อไปสามารถศึกษากับระบบที่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีที่ไหลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยศึกษาถึงผลกระทบต่อระบบและหากกลไกราคาที่เหมาะสมเพื่อความคุ้มค่าให้ระบบคงประสิทธิภาพให้มากที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ปานจิต ดำรงกุลกำจร. 2543. เอกสารประกอบการสอนวิชา **Computer Methods in Power System Analysis**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Baniya, J., F. Bao, S. Fan and L. Chen. 2005. Evaluating transmission services for bilateral transactions in electricity market. **IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exhibition**. 1-6.
- Chen, L., H. Suzuki, T. Wachi and Y. Shimura. 2002. Components of nodal prices for electric power systems. **IEEE Trans. Power Syst.** 17: 41-49.
- Galiana, F.D., A.J. Conejo and H.A. Gil. 2003. Transmission network cost allocation based on equivalent bilateral exchanges. **IEEE Trans. Power Syst.** 18: 3-10.
- Galiana, F.D., I. Kockar and P.C. Franco. 2002. Combined pool/bilateral dispatch – path I: performance of trading strategies. **IEEE Trans. Power Syst.** 17: 92-99.
- Gedra, T.W. 1999. On transmission congestion and pricing. **IEEE Trans. Power Syst.** 14: 241-248.
- Gil, H.A., F.D. Galiana and E.L.D. Silva. 2006. Nodal price control: a mechanism for transmission network cost allocation. **IEEE Trans. Power Syst.** 21: 3-10.
- Leotard, J-P. and M. Ilić. 1999. On the objectives of transmission pricing under open access. **IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting**. 1: 476- 483.

- Pantos, M., D. Grgic and F. Gubina. 2003. New transmission service pricing technique based on actual power flows. **IEEE Bologna PowerTech Conference**. 3: 1-6.
- Shirmohammad, D., X.V. Filho, B. Gorenstin and M.V.F. Pereira. 1996. Some fundamental technical concept about cost based transmission pricing. **IEEE Trans. Power Syst.** 11: 1002-1008.
- Singh, H., S. Hao and A. Papalexopoulos. 1998. Transmission congestion management in competitive electricity markets. **IEEE Trans. Power Syst.** 132: 672-680.
- Wakefield, R.A., J.S. Graves and A.F. Vojdani. 1997. A transmission services costing framework. **IEEE Trans. Power Syst.** 12: 622-628.
- Wood, A.J. and B.F. Wollenberg. 1996. **Power Generation Operation and Control**. 2nd ed. John Wiley & Son Inc., United States of America.
- Zhang, D., Y. Wang and P.B. Luh. 2000. Optimization based bidding strategies in the deregulated market. **IEEE Trans. Power Syst.** 15: 981-986.
- Zimmerman, R.D., C.E. Murillo-Sánchez and D.D. Gan. 2008. **Matpower**. MATPOWER Home Page. Available Source: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>, March 3, 2008

ภาคผนวก

ข้อมูลระบบจำลอง IEEE 30 บัส ของ MATPOWER

System MVA base = 100 MVA

ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจำลอง IEEE 30 บัส

Bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	Status	Pmax	Pmin
1	23.54	0	150	-20	1	100	1	80	0
2	60.97	0	60	-20	1	100	1	80	0
22	21.59	0	62.5	-15	1	100	1	50	0
27	26.91	0	48.7	-15	1	100	1	55	0
23	19.2	0	40	-10	1	100	1	30	0
13	37	0	44.7	-15	1	100	1	40	0

ตารางผนวกที่ 2 ข้อมูลค่าใช้จ่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในจำลอง IEEE 30 บัส

Bus	Startup	Shutdown	n	a	b	c
1	0	0	3	0.02	2	0
2	0	0	3	0.0175	1.75	0
22	0	0	3	0.0625	1	0
23	0	0	3	0.00384	3.25	0
27	0	0	3	0.025	3	0
13	0	0	3	0.025	3	0

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลบัสในระบบจำลอง IEEE 30 บัส

Bus	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area	Vm	Va	BasekV	Zone	Vmax	Vmin
1	3	0	0	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
2	2	21.7	12.7	0	0	1	1	0	135	1	1.1	0.95
3	1	2.4	1.2	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
5	1	0	0	0	0.19	1	1	0	135	1	1.05	0.95
6	1	0	0	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
8	1	30	30	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
9	1	0	0	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
10	1	5.8	2	0	0	3	1	0	135	1	1.05	0.95
11	1	0	0	0	0	1	1	0	135	1	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
13	2	0	0	0	0	2	1	0	135	1	1.1	0.95
14	1	6.2	1.6	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
15	1	8.2	2.5	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
17	1	9	5.8	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
18	1	3.2	0.9	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	0	0	2	1	0	135	1	1.05	0.95
21	1	17.5	11.2	0	0	3	1	0	135	1	1.05	0.95
22	2	0	0	0	0	3	1	0	135	1	1.1	0.95
23	2	3.2	1.6	0	0	2	1	0	135	1	1.1	0.95
24	1	8.7	6.7	0	0.04	3	1	0	135	1	1.05	0.95
25	1	0	0	0	0	3	1	0	135	1	1.05	0.95
26	1	3.5	2.3	0	0	3	1	0	135	1	1.05	0.95
27	2	0	0	0	0	3	1	0	135	1	1.1	0.95

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Bus	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area	Vm	Va	BasekV	Zone	Vmax	Vmin
28	1	0	0	0	0	3	1	0	135	1	1.05	0.95
29	1	2.4	0.9	0	0	3	1	0	135	1	1.05	0.95
30	1	10.6	1.9	0	0	3	1	0	135	1	1.05	0.95

ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลสายส่งในระบบจำลอง IEEE 30 บัส

From Bus	To Bus	r	x	b	Rate A	Rate B	Rate C	Ratio	Angle	Status
1	2	0.02	0.06	0.03	130	130	130	0	0	1
1	3	0.05	0.19	0.02	130	130	130	0	0	1
2	4	0.06	0.17	0.02	65	65	65	0	0	1
3	4	0.01	0.04	0	130	130	130	0	0	1
2	5	0.05	0.2	0.02	130	130	130	0	0	1
2	6	0.06	0.18	0.02	65	65	65	0	0	1
4	6	0.01	0.04	0	90	90	90	0	0	1
5	7	0.05	0.12	0.01	70	70	70	0	0	1
6	7	0.03	0.08	0.01	130	130	130	0	0	1
6	8	0.01	0.04	0	32	32	32	0	0	1
6	9	0	0.21	0	65	65	65	0	0	1
6	10	0	0.56	0	32	32	32	0	0	1
9	11	0	0.21	0	65	65	65	0	0	1
9	10	0	0.11	0	65	65	65	0	0	1
4	12	0	0.26	0	65	65	65	0	0	1
12	13	0	0.14	0	65	65	65	0	0	1
12	14	0.12	0.26	0	32	32	32	0	0	1
12	15	0.07	0.13	0	32	32	32	0	0	1

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

From Bus	To Bus	r	x	b	Rate A	Rate B	Rate C	Ratio	Angle	Status
12	16	0.09	0.2	0	32	32	32	0	0	1
14	15	0.22	0.2	0	16	16	16	0	0	1
16	17	0.08	0.19	0	16	16	16	0	0	1
15	18	0.11	0.22	0	16	16	16	0	0	1
18	19	0.06	0.13	0	16	16	16	0	0	1
19	20	0.03	0.07	0	32	32	32	0	0	1
10	20	0.09	0.21	0	32	32	32	0	0	1
10	17	0.03	0.08	0	32	32	32	0	0	1
10	21	0.03	0.07	0	32	32	32	0	0	1
10	22	0.07	0.15	0	32	32	32	0	0	1
21	22	0.01	0.02	0	32	32	32	0	0	1
15	23	0.1	0.2	0	16	16	16	0	0	1
22	24	0.12	0.18	0	16	16	16	0	0	1
23	24	0.13	0.27	0	16	16	16	0	0	1
24	25	0.19	0.33	0	16	16	16	0	0	1
25	26	0.25	0.38	0	16	16	16	0	0	1
25	27	0.11	0.21	0	16	16	16	0	0	1
28	27	0	0.42	0	65	65	65	0	0	1
27	29	0.22	0.42	0	16	16	16	0	0	1
27	30	0.32	0.6	0	16	16	16	0	0	1
29	30	0.24	0.45	0	16	16	16	0	0	1
8	28	0.06	0.2	0.02	32	32	32	0	0	1
6	28	0.02	0.06	0.01	32	32	32	0	0	1

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นายณรงค์ศักดิ์ เรืองโฉม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	10 กุมภาพันธ์ 2524
สถานที่เกิด	อำเภอเขมราฐ จังหวัดอุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-