



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี

Optimal Allocation of Operating Reserve in Electricity Markets with Bilateral Transactions

นามผู้วิจัย นายชาญณรงค์ สุขสมานพานิชย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานจิต คำรงกุลกำจร, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขาย  
แบบทวิภาคี

Optimal Allocation of Operating Reserve in Electricity Markets with Bilateral Transactions

โดย

นายชาญณรงค์ สุขสมานพาณิชย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชาญณรงค์ สุขสมานพานิชย์ 2557: การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานจิต คำรงกุลกำจร, Ph.D. 66 หน้า

บทความนี้นำเสนอการจัดสรรปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีและแบบผ่านตลาดกลาง โดยการเพิ่มตัวแปรกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบในฟังก์ชันเป้าหมายและเพิ่มเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุม แบบเดินเครื่องและแบบไม่เดินเครื่อง ภายใต้ข้อกำหนดซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกฎเกณฑ์ในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยใช้หลักการวิเคราะห์หาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดทำให้ทราบถึงปริมาณกำลังการผลิตและปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละสายส่ง ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่น้อยที่สุดของระบบซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคีรวมถึงค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรอง

การศึกษาใช้โปรแกรม MATLAB เขียนฟังก์ชันการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ภายใต้กฎเกณฑ์ที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้า อิศระนิวยอร์ก (New York ISO) และแคลิฟอร์เนีย (California ISO)

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Channarong Suksamanphanith 2014: Optimal Allocation of Operating Reserve in Electricity Markets with Bilateral Transactions. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Parnjit Damrongkulkamjorn, Ph.D. 66 pages.

This thesis proposes the study of optimally allocating the operating reserve in electricity markets that have both bilateral transactions and pool transactions. The additional reserve variables are included in the objective function along with the new constraints on regulation reserve, spinning and non-spinning reserves. The conditions on those reserves are based on parts of reserve regulation in existing electricity markets. The study applies the optimal power flow to determine the capacity of optimal generation dispatched and operating reserve capacity of generators, power flow in transmission lines, bus voltage magnitude and angle. The minimum total cost of system includes the cost of pool transactions and bilateral transactions and the cost of operating reserve.

The proposed algorithm is programmed in MATLAB and tested with a modified IEEE 30 bus system under certain NYISO and CAISO reserve regulations.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานจิต คำรงกุลกำจร ประธานกรรมการที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์  
จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความ  
กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบ  
ความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณพี่และเพื่อนที่  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้  
อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ชาญณรงค์ สุขสมานพาณิชย์  
กรกฎาคม 2557

## สารบัญ

## หน้า

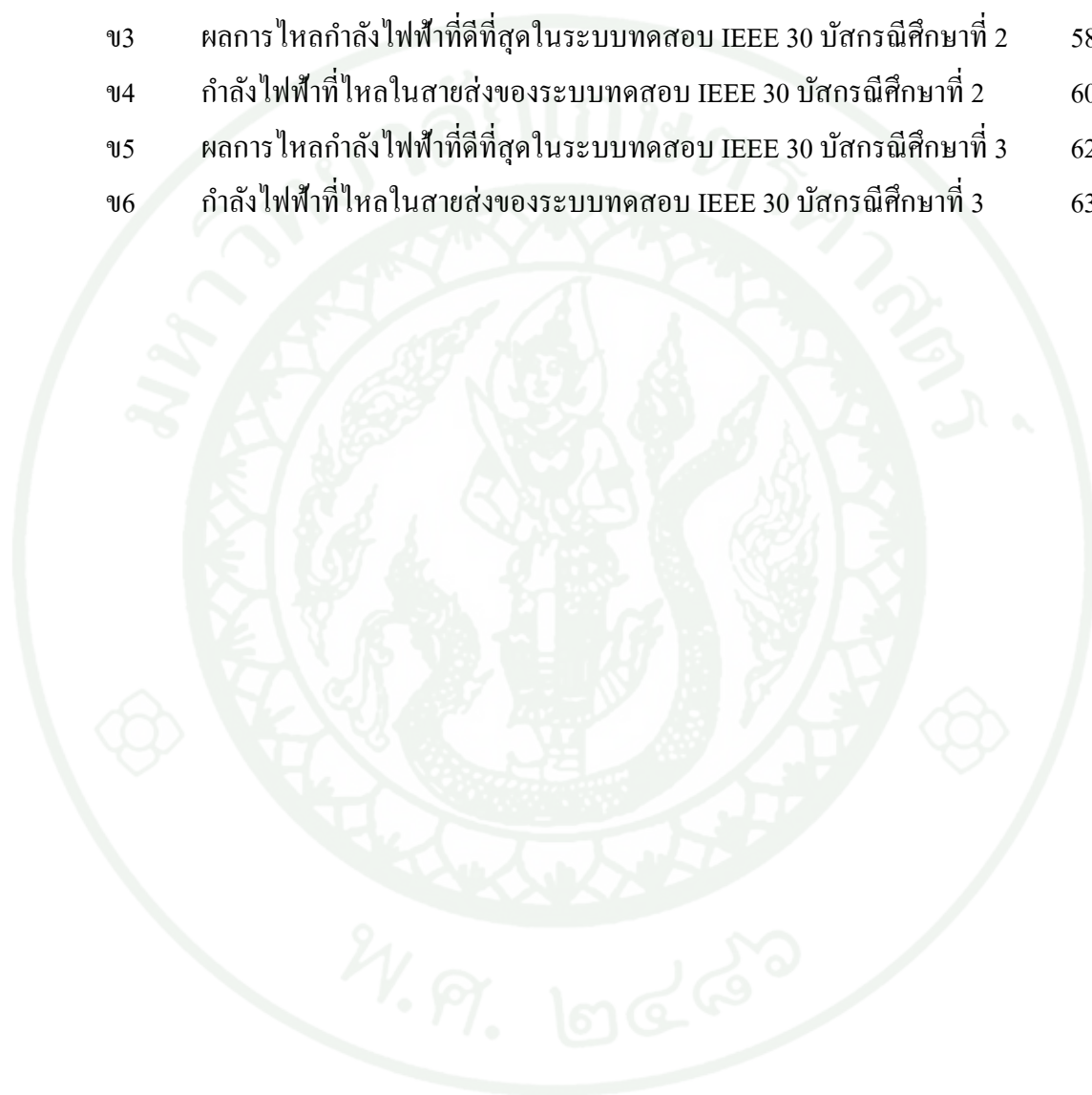
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	16
อุปกรณ์	16
วิธีการ	16
ผลและวิจารณ์	34
ผล	34
วิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	43
สรุป	43
ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47
ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	48
ภาคผนวก ข รายละเอียดผลลัพธ์ของกรณีศึกษา	54
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	66

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1	22
2	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2	23
3	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13	25
4	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 22	27
5	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 23	29
6	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 27	31
7	พิกัดต่ำสุด สูงสุดและราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	35
8	พิกัดสูงสุดและราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	36
9	ข้อมูลการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบภายใต้กฎเกณฑ์ที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์กและแคลิฟอร์เนีย	36
10	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2 และ 3	36
11	กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบของทุกกรณีศึกษา	39
12	ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบของทุกกรณีศึกษา	40
ตารางผนวกที่		
ก1	ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	49
ก2	ข้อมูลค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	49
ก3	ข้อมูลพิกัดสูงสุดและค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	50
ก4	ข้อมูลบัสในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	50
ก5	ข้อมูลสายส่งในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	51
ข1	ผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 1	55
ข2	กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 1	56

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข3	ผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบทดสอบ IEEE 30 บัณฑิตศึกษาที่ 2	58
ข4	กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัณฑิตศึกษาที่ 2	60
ข5	ผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบทดสอบ IEEE 30 บัณฑิตศึกษาที่ 3	62
ข6	กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัณฑิตศึกษาที่ 3	63



## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางในตลาดเสรี	4
2	การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคีและแบบผ่านตลาดกลางในตลาดเสรี	6
3	การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในตลาดเสรีที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี	11
4	ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1	22
5	การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1	23
6	ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2	24
7	การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2	25
8	ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13	26
9	การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13	27
10	ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 22	28
11	การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 22	29
12	ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 23	30
13	การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 23	31
14	ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 27	32
15	การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 27	33
16	ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	35

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$C_{Energy}$	คือ	ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายในระบบ (\$/h)
$C_{Reserve}$	คือ	ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าสำรอง (Operating Reserve) ในระบบ (\$/h)
$C_{Total}$	คือ	ผลรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบ (\$/h)
$C_i$	คือ	ฟังก์ชันราคาของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส $i$ (\$/MWh)
$C_i^B$	คือ	ฟังก์ชันราคาของกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายแบบทวิภาคี (Bilateral Transactions) ที่บัส $i$ (\$/MWh)
$C_i^{NS}$	คือ	ฟังก์ชันราคาของกำลังไฟฟ้าสำรองแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) ที่บัส $i$ (\$/MWh)
$C_i^P$	คือ	ฟังก์ชันราคาของกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง (Pool Transactions) ที่บัส $i$ (\$/MWh)
$C_i^{RD}$	คือ	ฟังก์ชันราคาของกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลด (Regulation Down) ที่บัส $i$ (\$/MWh)
$C_i^{RU}$	คือ	ฟังก์ชันราคาของกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up) ที่บัส $i$ (\$/MWh)
$C_i^{SP}$	คือ	ฟังก์ชันราคาของกำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) ที่บัส $i$ (\$/MWh)
$E_{D_j}^B$	คือ	รายจ่ายจากการซื้อกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคีของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$E_{D_j}^{NS}$	คือ	รายจ่ายจากการซื้อกำลังไฟฟ้าสำรองแบบไม่เดินเครื่องของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$E_{D_j}^P$	คือ	รายจ่ายจากการซื้อกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$E_{D_j}^R$	คือ	รายจ่ายทั้งหมดจากการซื้อกำลังไฟฟ้าสำรองของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$E_{D_j}^{RD}$	คือ	รายจ่ายจากการซื้อกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลดของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$E_{D_j}^{RU}$	คือ	รายจ่ายจากการซื้อกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่มของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$E_{D_j}^{SP}$	คือ	รายจ่ายจากการซื้อกำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$E_{D_j}^{Total}$	คือ	รายจ่ายทั้งหมดของโหลดที่บัส $j$ (\$/h)
$I_{Bus}$	คือ	เซตของบัสทั้งหมดในระบบ
$I_{Gen}$	คือ	เซตของบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ
$I_{Line}$	คือ	เซตของสายส่งทั้งหมดในระบบ

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$I_{Load}$	คือ	เซตของบัสโหลดในระบบ
$I_{NS}$	คือ	เซตของบัสที่มีกำลังไฟฟ้าสำรองแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve)
$I_{RD}$	คือ	เซตของบัสที่มีกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลด (Regulation Down)
$I_{RU}$	คือ	เซตของบัสที่มีกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up)
$I_{SP}$	คือ	เซตของบัสที่มีกำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve)
$NS_{G_i}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$NS_{G_i}^{max}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าสำรองจริงสูงสุดแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$P_{D_i}$	คือ	ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส $i$ (MW)
$P_{G_i}$	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$P_{G_i}^B$	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ เนื่องมาจากสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี (Bilateral Transactions) (MW)
$P_{G_i}^P$	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ เนื่องมาจากการซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง (Pool Transactions) (MW)
$P_{G_i}^{max}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$Q_{D_i}$	คือ	ความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส $i$ (MVAR)
$Q_{G_i}$	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MVAR)
$Q_{G_i}^{max}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MVAR)
$Q_{G_i}^{min}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MVAR)
$R^{NS}$	คือ	ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) ในระบบ (MW)
$R^{RD}$	คือ	ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบปรับลด (Regulation Down) ในระบบ (MW)
$R^{RU}$	คือ	ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up) ในระบบ (MW)

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$R^{SP}$	คือ	ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) ในระบบ (MW)
$R_{G_i}^B$	คือ	รายได้จากการขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$R_{G_i}^{NS}$	คือ	รายได้จากการขายกำลังไฟฟ้าสำรองแบบไม่เดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$R_{G_i}^P$	คือ	รายได้จากการขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$R_{G_i}^R$	คือ	รายได้ทั้งหมดจากการขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$R_{G_i}^{RD}$	คือ	รายได้จากการขายกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$R_{G_i}^{RU}$	คือ	รายได้จากการขายกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$R_{G_i}^{SP}$	คือ	รายได้จากการขายกำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$R_{G_i}^{Total}$	คือ	รายได้ทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (\$/h)
$RD_{G_i}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบปรับลด (Regulation Down) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$RD_{G_i}^{max}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าสำรองจริงสูงสุดแบบปรับลด (Regulation Down) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$RR_{G_i}^{OP}$	คือ	อัตราความชันของผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) และแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ ภายในเวลา 10 นาที (MW/min.)
$RR_{G_i}^{RU}$	คือ	อัตราความชันของกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ ภายในเวลา 10 นาที (MW/min.)
$RU_{G_i}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$RU_{G_i}^{\max}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าสำรองจริงสูงสุดแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$S_{L_i}$	คือ	กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่ $i$ (MW)
$S_{L_i}^{\max}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดของโหลดที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่ $i$ (MW)
$SP_{G_i}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$SP_{G_i}^{\max}$	คือ	พิกัดกำลังไฟฟ้าสำรองจริงสูงสุดแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$ (MW)
$V_i$	คือ	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส $i$ (V)
$V_i^{\max}$	คือ	พิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่บัส $i$ (V)
$V_i^{\min}$	คือ	พิกัดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส $i$ (V)
$\delta_i$	คือ	มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส $i$ (Deg)

## การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี

### Optimal Allocation of Operating Reserve in Electricity Markets with Bilateral Transactions

#### คำนำ

ในปัจจุบันกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบเริ่มมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกรณีเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินแล้วส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเกิดขัดข้อง ซึ่งในบางครั้งอาจร้ายแรงจนถึงขั้นทำให้เกิดไฟดับเป็นวงกว้าง (Black Out) จึงส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังอย่างใหญ่หลวง ดังนั้นเพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์เหล่านี้ให้น้อยลงสำหรับตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบเสรี ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระ (Independent System Operator : ISO) เป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเพิ่มความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังและทำให้เกิดความยุติธรรมมากที่สุดระหว่างผู้ขายกับผู้ซื้อไฟฟ้า ซึ่งกฎเกณฑ์ในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสำรองนั้นในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ตามภูมิศาสตร์ตามความต้องการของโหลดในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องอ้างอิงกฎเกณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เกิดความยุติธรรมระหว่างผู้ขายกับผู้ซื้อไฟฟ้ามากที่สุด

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดสรรปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง (Pool Transactions) และแบบทวิภาคี (Bilateral Transactions) โดยการเพิ่มตัวแปรกำลังไฟฟ้าสำรอง (Operating Reserve) ของระบบในฟังก์ชันเป้าหมายและเพิ่มเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุม (Regulation Reserve) แบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) และแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) โดยใช้หลักการวิเคราะห์หาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดเพื่อให้ทราบถึงปริมาณกำลังการผลิตและปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละสายส่ง ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่น้อยที่สุดของระบบซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายการซื้อกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคีรวมถึงค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรอง

การศึกษาใช้โปรแกรม MATLAB มาทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสเพื่อวิเคราะห์หาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบที่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีภายใต้เกณฑ์ที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์ก (New York ISO) และแคลิฟอร์เนีย (California ISO)



## วัตถุประสงค์

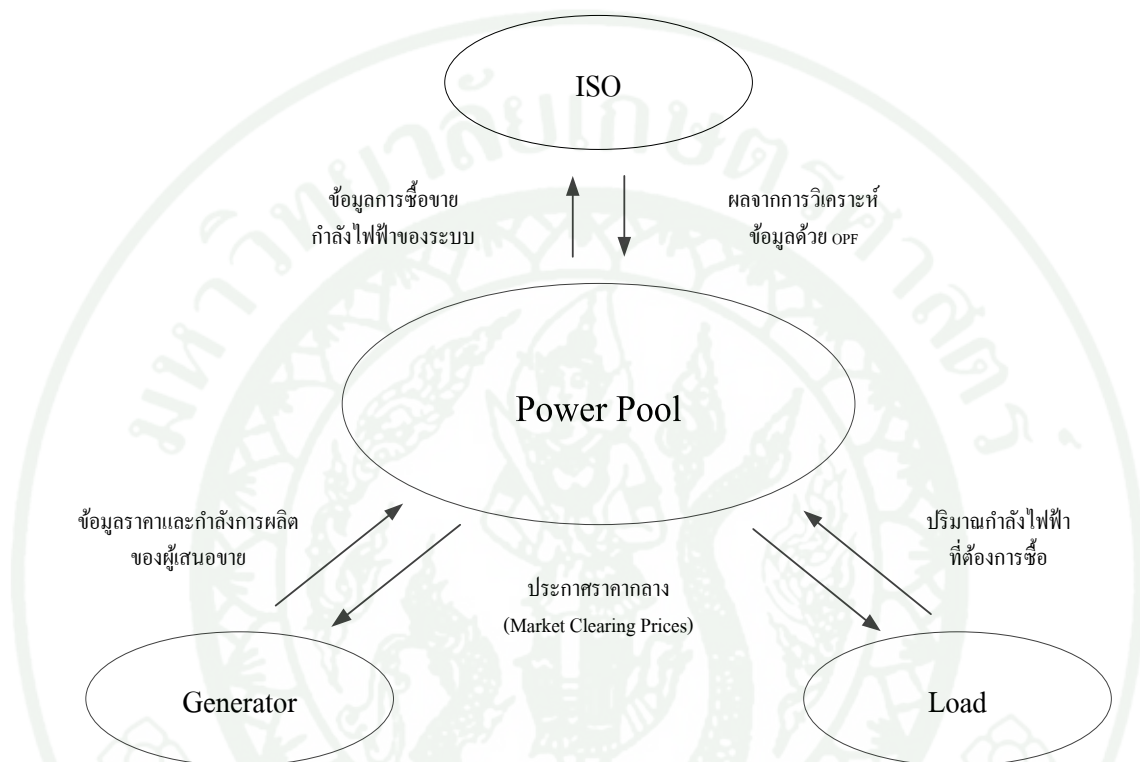
เพื่อศึกษาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าในตลาดซื้อขายไฟฟ้าทั้งในกรณีซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคี ผลกระทบต่อระบบเมื่อศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองเพิ่มเข้ามาในระบบ โดยพิจารณากำลังไฟฟ้าสำรอง (Operating Reserve) ซึ่งประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุม กำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องและกำลังไฟฟ้าสำรองแบบไม่เดินเครื่อง ภายใต้กฎเกณฑ์การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์ก (NYISO) และ แคลิฟอร์เนีย (CAISO)

## ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการจัดสรรปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแต่ละเครื่องอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าทั้งในกรณีซื้อขายผ่านตลาดและในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี โดยการเพิ่มตัวแปรของระบบกำลังไฟฟ้าสำรองลงในฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) และเพิ่มฟังก์ชันเงื่อนไข (Constrain Functions) ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่มีระบบกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุม (Regulation Reserve) แบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) และแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) ภายใต้กฎเกณฑ์ในการจัดสรรระบบกำลังไฟฟ้าสำรองที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์ก (NYISO) และแคลิฟอร์เนีย (CAISO) โดยใช้ระบบของ *IEEE 30bus* แล้วคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยที่โหลดรวม ณ บัสใด ๆ มีค่าคงที่ ไม่มีการตัดโหลดและข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์นั้นได้ผ่านการแก้ปัญหาการสั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Commitment : UC)

## การตรวจเอกสาร

### 1. การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางในตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรี



ภาพที่ 1 การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางในตลาดเสรี

ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ (2551); จตุรวิทย์ (2554)

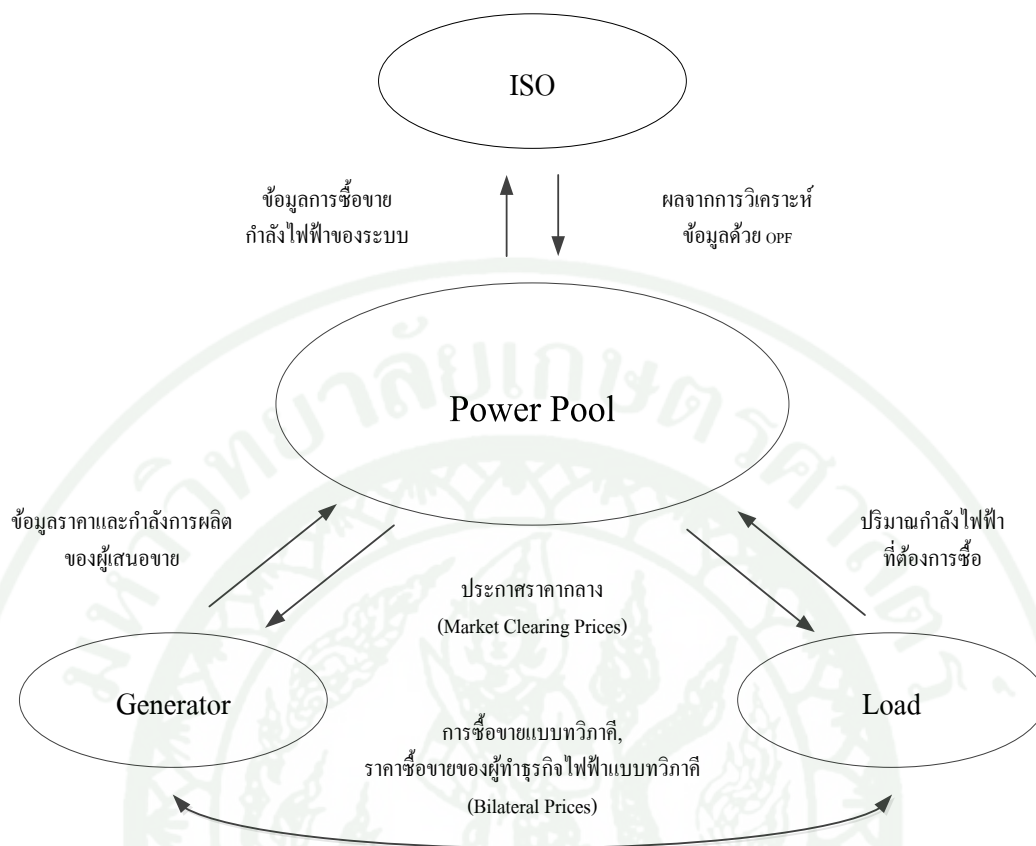
การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลาง คือ การซื้อขายกำลังไฟฟ้าโดยผู้ผลิตต้องเสนอราคาขายและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ให้แก่ตลาดกลาง (Power Pool) พร้อมกันนั้นผู้ซื้อต้องส่งข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้กับตลาดกลางเช่นกัน ข้อมูลจากทั้งสองส่วนถูกส่งให้กับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระ (Independent System Operator: ISO) เพื่อวิเคราะห์หาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด หากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ทำการซื้อขายนั้นทำให้ระบบขาดเสถียรภาพทางไฟฟ้า เช่น ในกรณีที่มีผู้ซื้อต้องการปริมาณกำลังไฟฟ้ามกเกินกว่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สายส่งสามารถรองรับได้ทำให้เกิดสถานะเกินพิกัด ดังนั้นศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีความจำเป็นต้องปรับ

ปริมาณกำลังไฟฟ้าในส่วนของผู้ผลิตหรือในส่วนของผู้ซื้อ หรือทั้งสองส่วนตามความเหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับข้อตกลงภายใต้กฎเกณฑ์ในแต่ละพื้นที่ ถ้าการปรับเปลี่ยนทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบในระดับที่สามารถยอมรับได้ ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องส่งสรุปผลข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ให้กับตลาดกลางเพื่อนำไปใช้ประกาศราคากลาง (Market Clearing Prices) ในตลาดไฟฟ้าแบบเสรี

Wakefield et al. (1997) เสนอความสำคัญของสายส่งที่ใช้เชื่อมระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อ กำลังไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศอื่นๆที่มีการเพิ่มระดับการแข่งขันในกลุ่มผู้จำหน่ายไฟฟ้า นับตั้งแต่ปี 1992 ทำให้การเข้าใช้สายส่งเพิ่มมากขึ้น ต่อมามีการกำหนดค่าใช้สายส่งทั้งทางตรงและทางอ้อมเพื่อความเหมาะสม ซึ่งในบทความนี้ใช้แนวทางการคิดค่าใช้สายส่ง 3 แบบ คือ กำหนดลักษณะการใช้สายส่ง ค่าใช้สายส่งตามลักษณะการใช้และการคำนวณค่าใช้สายส่ง โดยศึกษาผลกระทบจากการใช้สายส่ง ผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบและการกำหนดราคาสายส่งที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทั้งระยะสั้นและยาว

## 2. การซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีและแบบผ่านตลาดกลางในตลาดไฟฟ้าเสรี

การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral Transactions) คือ การซื้อขายกำลังไฟฟ้าโดยตรงระหว่างผู้ซื้อและผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าตกลงทำสัญญาซื้อขายกันเองโดยไม่ผ่านตลาดกลาง ถึงแม้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายกันนั้นจะไม่กระทำผ่านตลาดกลาง แต่ยังคงต้องใช้สายส่งร่วมกันกับตลาดกลาง ดังนั้นผู้ซื้อและผู้ผลิตที่ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี ต้องส่งข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายให้กับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระเพื่อให้ผู้ดูแลระบบวิเคราะห์การทำงานของระบบได้ ดังนั้นทำให้กำลังไฟฟ้าที่ต้องผลิตแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ผลิตให้กับตลาดกลาง (Pool Transactions) และส่วนที่ผลิตให้กับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี



ภาพที่ 2 การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคีและแบบผ่านตลาดกลางในตลาดเสรี

ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ (2551); จตุรวิทย์ (2554)

Galiana et al. (2002a) เสนอการศึกษาความสัมพันธ์ที่เหมาะสม ในการทำสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีร่วมกับการซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางในตลาดเดียวกัน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการจัดการกับระบบซื้อขายไฟฟ้าเสรีมีจุดประสงค์หลัก คือ การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคีทางด้านระดับการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความสมดุลกันระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดและความเสี่ยงในระบบเนื่องจากการใช้สายส่งเต็มพิกัด ดังนั้นความเข้าใจในระดับการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้าในระบบรวมทั้งการซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคีเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญมากที่สุด คือ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดและค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบต้องน้อยที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของสายส่งและระดับความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้า โดยกำหนดให้ระดับกำลังการผลิตต่ำสุดของผู้ผลิตที่ทำสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีไว้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ทำสัญญาซื้อขาย

แบบทวิภาคี การคำนวณใช้กับระบบทดสอบ 5 บัส มีการทำสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีและแบบผ่านตลาดกลาง โดยมีค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบคงที่และสามารถเลือกระดับการซื้อขายทั้ง 2 แบบตามกรณีศึกษาดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 ระบบมีการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลาง 41.2% และแบบทวิภาคี 58.8% ของระบบ

กรณีศึกษาที่ 2 ระบบมีการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลาง 8.8% และแบบทวิภาคี 91.2% ของระบบ

กรณีศึกษาที่ 3 ระบบมีเฉพาะการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี 100% ของระบบ

จากการวิเคราะห์ทั้ง 3 กรณีศึกษาพบว่า

1. กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่สูญเสียในสายส่งในกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากัน
2. ค่าใช้จ่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบสูงขึ้น 0.2%
3. ผลจากการใช้สายส่งจนเต็มพิกัดทำให้ผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางต้องซื้อในราคาที่สูงขึ้น
4. เกิดผลกระทบต่อราคาที่เป็นลบอย่างชัดเจนเนื่องจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี

Galiana et al. (2002b) เสนอการศึกษาความสัมพันธ์ที่เหมาะสม ในการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีร่วมกับระบบการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางเพื่อเป็นแนวทางในการจัดการระบบซื้อขายไฟฟ้าเสรี โดยจุดประสงค์หลัก คือ การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการซื้อขายไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคีทางด้านระดับการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายกับความเสถียรของระบบที่จะเกิดการใช้สายส่งเต็มพิกัด นอกจากนี้ลักษณะการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีที่มีสองลักษณะ คือ สัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง (Firm Bilateral Transactions) และสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่

มั่นคง (Nonfirm Bilateral Transactions) โดยจะมีการเสนอราคาเพื่อการปรับลดสัญญา (Curtailment Bids) ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง และจะมีการเสนอราคาเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญา (Noncurtailment Bids) ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคงด้วย สมการการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดถูกเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมกับการดำเนินการในรายงานส่วนที่สองนี้ รวมไปถึงการคิดรายได้ของผู้ผลิตไฟฟ้าที่ได้จากการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีและรายได้จากการขายไฟฟ้าให้กับตลาดกลางรวมไปถึงค่าใช้จ่ายของผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ซื้อไฟฟ้า ภายใต้ข้อจำกัดของสายส่งและระดับความสามารถในการผลิต โดยกำหนดให้ระดับการผลิตต่ำสุดของผู้ผลิตที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี ต้องผลิตกำลังไฟฟ้าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ได้ทำสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีไว้แล้วสำหรับการคำนวณใช้ระบบทดสอบ 5 บัส โดยการซื้อขายแบบทวิภาคีนั้นเปรียบเทียบรายได้และรายจ่ายของผู้ร่วมทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี โดยพิจารณาจากระดับการซื้อขายนากำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี แบ่งเป็น 2 แบบตามกรณีศึกษาดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 ระบบมีการซื้อขายนากำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี 100% ของระบบและมีการเสนอราคาปรับลดสัญญา

กรณีศึกษาที่ 2 ระบบมีซื้อขายนากำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี 100% ของระบบ และไม่มีมีการเสนอราคาปรับลดสัญญา

จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 กรณีศึกษาพบว่าในกรณีศึกษาที่ 1 มีรายได้สูงกว่าและมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่ากรณีศึกษาที่ 2

เอกสาร (2547) เสนอโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองสถานะการซื้อขายไฟฟ้าในตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรี ที่มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบนอกตลาดกลางและแบบผ่านตลาดกลาง เพื่อศึกษาการจัดการตลาดในด้านกำลังการผลิตของผู้ผลิตและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายในทุกสถานะ เพื่อเป็นแนวทางในการหาวิธีจัดการออกกฎข้อบังคับเพื่อความเป็นธรรมของทุกฝ่ายหรือเป็นแนวทางในการเลือกซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลางหรือนอกตลาดกลางของผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้า หลักการทำงานของโปรแกรมในสถานะปกติใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดโดยวิธีประมาณเพื่อให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและทุกรายการซื้อขายได้รับกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการแต่ถ้าระบบเกิดสถานะเกินพิกัดทำให้มีการใช้ค่าน้ำหนัก (Weight) ซึ่งแปรผันตามจำนวนเงินที่จ่ายเพิ่ม

พิเศษเพื่อการตัดสินใจลดกำลังไฟฟ้าตามรายการซื้อขายที่จ่ายน้อยที่สุดออกก่อน เพื่อแก้ไขสถานะเกินพิกัด โปรแกรมใช้กับระบบทดสอบ 5 บัสพบว่าการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกลางที่บัสปลายทางทำให้เกิดผลกระทบต่อการซื้อขายโดยรวม ในขณะที่เกิดสถานะเกินพิกัดถึงแม้ว่าบางรายการซื้อขายมีค่าน้ำหนักเท่ากันแต่ถูกตัดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการไม่เท่ากัน การซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกลางที่ไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าต้องถูกตัดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการมากกว่าเพราะเป็นสาเหตุหลักของการทำให้เกิดสถานะเกินพิกัด ส่วนการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกลางที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่ถูกตัดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

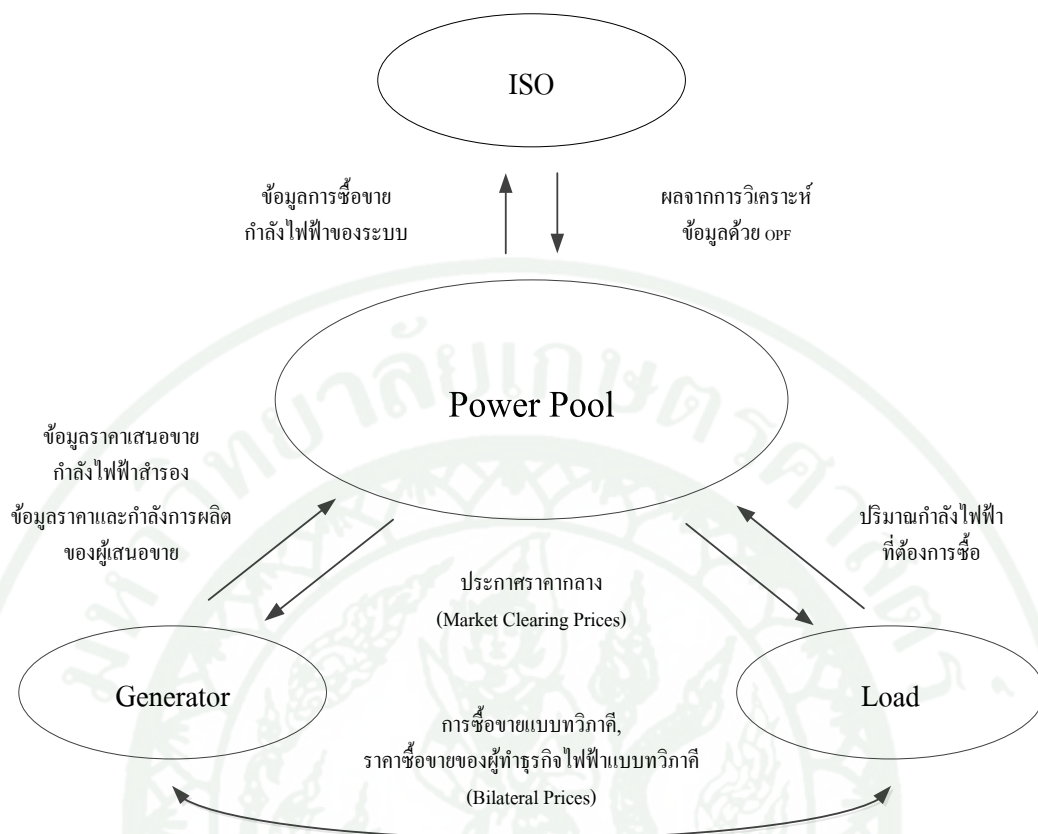
ณรงค์ศักดิ์ (2551) เสนอการศึกษาการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี ในตลาดที่มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลาง ในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้า และการคิดราคาสายส่ง โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดและการคิดราคาสายส่งสำหรับผู้ค้าในตลาดทั้งหมดด้วยราคาไฟฟ้าที่บัส (Nodal Price) การศึกษาใช้โปรแกรม MATLAB ชื่อ MATPOWER โดยการเพิ่มฟังก์ชันโปรแกรมคำนวณการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีในระบบทดสอบ 30 บัส โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการศึกษา ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 ระบบไม่มีการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี กรณีศึกษาที่ 2 ระบบมีการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี 1 คู่ โดยโหลดที่บัส 2 ซื้อกำลังไฟฟ้าจากผู้ผลิตที่บัส 2 กรณีศึกษาที่ 3 ระบบมีการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีหลายคู่ โดยโหลดที่บัส 2 7 และ 8 ซื้อกำลังไฟฟ้าจากผู้ผลิตที่บัส 2 โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดคำนวณและเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเนื่องจากสายส่งรายได้ของผู้ผลิตและรายจ่ายของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีศึกษาที่มีและไม่มีการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี ผลจากการศึกษาระบบ 30 บัสแสดงให้เห็นว่าการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีส่งผลกระทบต่อให้การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบและราคาที่มีมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าสายส่งเพิ่มขึ้นทั้งระบบ ผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าผ่านธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีอาจได้ราคาที่ถูกแต่ต้องมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นหากการชื้อขายนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดของระบบ นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นว่าการคิดราคาสายส่งด้วยราคาที่มีบัสสามารถใช้เป็นเครื่องมือให้ผู้ดูแลระบบจัดการกับปัญหานี้ได้

จตุรวิทย์ (2554) เสนอการศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหาสถานะเกินพิกัดเนื่องจากการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดเสรี โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดภายใต้สัญญาการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี 2 แบบ คือ สัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคงและสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง โดยมีการเสนอราคาเพื่อไม่ให้รับลดสัญญาสำหรับสัญญาซื้อ

ขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคงและสำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง การศึกษาใช้โปรแกรม MATLAB มาทดสอบการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี กับระบบทดสอบ IEEE 14 บัส ทำการวิเคราะห์ กำลังการผลิต การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ข้อจำกัดของระบบ กำลังไฟฟ้าที่ทำการซื้อขายแบบทวิภาคีที่ได้รับการจัดสรร ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ถ้าระบบเกิดการติดขัดของสายส่ง จนไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ตามสัญญาที่ซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี สามารถใช้ราคาเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญา มาแก้ไขปัญหาการเกิดการติดขัดของสายส่งได้ โดยผู้ซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคงจะต้องเสนอราคาเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญาในราคาที่สูงกว่าผู้ซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง ถ้าผู้ทำสัญญาไฟฟ้าแบบทวิภาคีต้องการได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการและป้องกันการถูกปรับลดสัญญาต้องยอมจ่ายราคาเสนอเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญาในราคาที่สูงกว่าสัญญาอื่นๆ ซึ่งการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคงจะถูกปรับลดกำลังไฟฟ้าก่อนการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคงเมื่อระบบเกิดสถานะติดขัดของสายส่ง ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีที่ถูกปรับลดลงถูกปรับเปลี่ยนให้ไปซื้อกำลังไฟฟ้าจากตลาดกลางแทน โดยที่โหนดมีค่าคงที่และไม่มีการตัดโหนด

### 3. การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในตลาดเสรีที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี

การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในตลาดเสรีที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี คือ การที่ผู้ผลิตต้องส่งข้อมูลราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองให้กับตลาดกลางพร้อมกับข้อมูลราคาเสนอขายทั้งในกรณีซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคีรวมทั้งข้อมูลกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพร้อมกับผู้ซื้อต้องส่งข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการทั้งในกรณีซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคี เมื่อตลาดกลางได้รับข้อมูลจากทั้ง 2 ส่วนแล้วส่งข้อมูลทั้งหมดให้กับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระเพื่อวิเคราะห์หาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดภายใต้กฎเกณฑ์การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์กและแคลิฟอร์เนีย ดังนั้นเมื่อได้ผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบทางศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระส่งข้อมูลให้ตลาดกลางเพื่อประกาศราคากลางและปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองที่ได้รับการจัดสรรภายใต้กฎเกณฑ์ของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระ



ภาพที่ 3 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในตลาดเสรีที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี

ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ (2551); จตุรวิทย์ (2554)

Papalexopoulos et al. (2004) เสนอการศึกษาวิเคราะห์หาค่าการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ กระแสสลับที่ดีที่สุดในตลาดที่มีสัญญาซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางและการจัดสรรกำลังไฟฟ้า สำรอง โดยการกำหนดราคาสำหรับกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสำรองแสดงอยู่ในรูปของสมการตัว คูณลากรองจ์ (Lagrange Multipliers) อย่างชัดเจน มีการคำนวณค่าสูญเสียโอกาสแปรผันกับปริมาณ ของกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบ โดยเฉพาะเงื่อนไขการการขายกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลดไม่ เกิดค่าสูญเสียโอกาสกับผู้ขาย รายงานนี้มีกรณีศึกษา 2 กรณีศึกษา ทดสอบกับระบบ 3 บัส มีค่าพิกัด สายส่ง 50 MW ทั้งขาไปและกลับ โหลดที่บัส 3 มีค่าคงที่เท่ากับ 150 MW มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่องอยู่ที่บัส 1, 2 และ 3 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 เครื่องมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 MW ค่าอัตรา ความจุในการผลิตกำลังไฟฟ้าต่อนาทีกำหนดให้มีค่านันต์ ตามกรณีศึกษาดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ระบบมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอยู่ 10 และ 30 MW ตามลำดับ จากกรณีศึกษาสามารถ

วิเคราะห์คุณสมบัติของราคาและความสัมพันธ์ของราคาขายกำลังไฟฟ้าที่ได้การคำนวณหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบดังนี้

1. ข้อกำหนดกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลดที่ทำให้เกิดค่าสูญเสียโอกาส คือ ถ้าระบบมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลดที่มีการปรับลดกำลังไฟฟ้ามกเกินเงื่อนไขปกติ กำลังไฟฟ้าสำรองที่ต่ำที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อราคาทั้งหมดในระบบ
2. ในทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม แบบเดินเครื่องและแบบไม่เดินเครื่อง ถ้าระบบมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองมีปริมาณมากเกินเงื่อนไขปกติกำลังไฟฟ้าสำรองที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อราคาทั้งหมดในระบบ
3. ราคากำลังไฟฟ้าสำรองในระบบประกอบด้วยค่าชดเชยสำหรับค่าสูญเสียโอกาสแล้ว ซึ่งไม่มีการคิดค่าใช้จ่ายสำหรับค่าสูญเสียโอกาสเนื่องจากการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรอง
4. ราคากำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่มต้องไม่น้อยกว่าแบบเดินเครื่องและราคา กำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องต้องไม่น้อยกว่าแบบไม่เดินเครื่อง
5. ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองที่ทำให้เกิดสถานะเกินพิกัดคำนวณจากราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าในระบบเท่านั้น
6. รายได้ทั้งหมดที่เกิดจากการขายกำลังไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสถานะเกินพิกัดของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนั้นต้องประกอบด้วยค่าใช้จ่ายที่ทำให้เกิดสถานะเกินพิกัดและต้องชดเชยรวมถึงค่าใช้จ่ายสำหรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ

Cuervo and Stacke (2008) เสนอการศึกษารูปแบบจำลองราคาในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีการซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง แบบทวิภาคีและแบบการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบ รูปแบบจำลองนำไปใช้ภายใต้ราคาแบบ MP (Marginal Pricing) หรือ แบบ PAB (Pay-As-Bid Pricing) การคิดราคาแบบ PAB นั้นใช้กระบวนการอินทิเกรตซึ่งเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาค่าการไหลกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ดีที่สุดเพื่อพิจารณาราคาเสนอขายแบบผ่านตลาดกลาง แบบทวิภาคีและ การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรอง ผลจากกรณีศึกษาแสดงให้เห็นว่าราคาของการซื้อขายกำลังไฟฟ้า

ทั้งหมดและกำลังไฟฟ้าสำรองมีอิทธิพลต่อระดับแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย ค่าพิกัดต่ำสุด และสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่ง ดังนั้นผลจากกรณีศึกษานำไปใช้เพื่อวางแผนราคาที่ตั้งผลกระทบต่อผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่และสัมพันธ์กับค่าใช้จ่ายในการผลิตในหลายๆ โครงการและกลยุทธ์ในการเสนอราคาขาย สำหรับในมุมมองของผู้ควบคุมระบบต้องให้ความสำคัญในการลดค่าใช้จ่ายให้มีค่าน้อยที่สุดด้วยหลักการคิดราคาแบบ PAB เพื่อรับประกันผู้ขายไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่งและความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบนอกจากนี้ต้องคำนวณบัญชีการเงินอย่างเหมาะสม กรณีศึกษาคำนวณแสดงอยู่ในรูปแบบจำลอง การคิดราคาแบบ PAB คือ การคิดราคาโดยใช้กระบวนการอินทิเกรตมาคำนวณเพื่อหาผลกระทบเนื่องจากการจัดสรร กำลังไฟฟ้าสำรองเพิ่มเข้ามาในระบบ โดยการคำนวณว่าการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองส่งผลกระทบต่อราคาทั้งหมดในตลาดอย่างไร จากการวิเคราะห์กรณีศึกษาพบว่า การคิดราคาแบบ PAB นั้น แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายที่คิดราคาแบบ PAB มีค่าน้อยกว่าการคิดราคาแบบ MP

#### 4. กำลังไฟฟ้าสำรอง (Operating Reserve)

กำลังไฟฟ้าสำรอง (Operating Reserve) แบ่งออกเป็น 3 แบบ (Department of Market Monitoring, 2007) คือ

4.1 กำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุม (Regulation Reserve) คือ ปริมาณของกำลังไฟฟ้าสำรองที่ถูกผลิตจากเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าซึ่งกำลังเดินเครื่องทำงานอยู่โดยการควบคุมของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระ ดังนั้นกระบวนการปรับระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยเครื่องควบคุมความถี่อัตโนมัติ (Automatic Generation Control : AGC) อย่างรวดเร็วเพื่อทำให้เกิดความสมดุลอย่างต่อเนื่องระหว่างปริมาณการผลิตกับปริมาณความต้องการในระบบ โดยกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุม (Regulation Reserve) สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

4.1.1 กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up) คือ การปรับระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าสำรองที่มีอยู่เข้าไปในระบบภายในเวลาอันรวดเร็วเพื่อเพิ่มค่าความถี่ที่ต่ำกว่าค่าพิกัดให้กลับมามีค่าเท่ากับค่าพิกัด

4.1.2 กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลด (Regulation Down) คือ การปรับระดับกำลังไฟฟ้าลดลง โดยการลดกำลังไฟฟ้าสำรองที่มีอยู่ในระบบภายในเวลาอันรวดเร็วเพื่อลดค่าความถี่ที่สูงกว่าค่าพิกัดให้กลับมามีค่าเท่ากับค่าพิกัด

4.2 กำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองที่ถูกผลิตเพิ่มขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งกำลังเดินเครื่องทำงานอยู่ในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ในระหว่างที่เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน สามารถแบ่งออกได้หลายแบบขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับระดับ

4.3 กำลังไฟฟ้าสำรองแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองที่ถูกผลิตเพิ่มขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งสามารถใช้งานได้แต่ยังไม่เดินเครื่องทำงานอยู่ในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ในระหว่างที่เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน สามารถแบ่งออกได้หลายแบบขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับระดับกำลังไฟฟ้า

Gomez et al. (1999) เสนอตลาดการบริการกำลังไฟฟ้าสำรองในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประกอบด้วยกฎเกณฑ์ของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระแคลิฟอร์เนีย (CAISO) ในการเปิดตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรีให้สำเร็จนั้นต้องประกอบด้วย การควบคุมของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระแคลิฟอร์เนียในการจัดสรรความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองทั้งหมดในระบบ กำลังไฟฟ้าสำรองช่วยรักษาความน่าเชื่อถือในระบบที่เชื่อมต่อกัน รัฐแคลิฟอร์เนียมีความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสำรองและการควบคุมความถี่ ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระแคลิฟอร์เนียมีหน้าที่จัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองโดยแบ่งออกเป็นตลาดการซื้อขายล่วงหน้าหนึ่งวัน และการซื้อขายล่วงหน้าหนึ่งชั่วโมง ริเริ่มตั้งแต่ฤดูร้อนของปี ค.ศ. 1998 เกิดปัญหาหลายอย่าง ประกอบด้วย ความไม่แน่นอนของราคาอย่างสุดขีดและราคาตลาดไม่สะท้อนให้เห็นว่าการปรับปรุงที่สำคัญที่นำมาทดสอบในฤดูร้อนของปี ค.ศ. 1999 เพื่อที่จะแก้ปัญหาข้อเสียเปรียบระหว่างผู้ที่ซื้อขายไฟฟ้าในตลาดโดยการจัดการของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระแคลิฟอร์เนีย กฎเกณฑ์ของกำลังไฟฟ้าสำรองแบ่งออกเป็น กำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุมมีค่าพิกัดต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 1% และ 5% ของโหลดทั้งหมด ส่วนใหญ่ในจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุมต้องมีค่าประมาณ 3% ของโหลดทั้งหมด ในส่วนของกำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องและไม่เดินเครื่องรวมกันต้องมีค่า 1 เท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในระบบเพื่อถ้าเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน ระบบสามารถชดเชยจากกำลังไฟฟ้าที่สำรองไว้

New York Independent System Operator (2011) เสนอคู่มือการบริการกำลังไฟฟ้าสำรอง กำลังไฟฟ้าสำรองแบ่งออกเป็นตามช่วงเวลาดังนี้ คือ 10 นาทีและ 30 นาที โดยมีกฎเกณฑ์ของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์ก (NYISO) คือ กำลังไฟฟ้าสำรองทั้งหมดต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในระบบ กำลังไฟฟ้าสำรองทั้งหมดแบบ 10 นาทีต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 เท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุด และกำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องภายในเวลา 10 นาทีต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.5 เท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุด



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)
2. ระบบปฏิบัติการ Window 7
3. โปรแกรม Microsoft Office
4. โปรแกรม MATLAB

### วิธีการ

งานวิจัยนี้ เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดในการคำนวณ ซึ่งประกอบด้วยปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง (Pool Transactions) ข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการซื้อขายแบบทวิภาคี (Bilateral Transactions) และปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรอง (Operating Reserve) ที่ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระ (ISO) ต้องการตามกฎหมาย ซึ่งในกำลังไฟฟ้าสำรองแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ กำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่อง (Spinning Reserve) กำลังไฟฟ้าสำรองแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning Reserve) กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม (Regulation Up) กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลด (Regulation Down) ภายใต้กฎหมายที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์ก (NYISO) และแคลิฟอร์เนีย (CAISO) ข้อมูลที่ได้มานั้นนำไปผ่านการแก้ปัญหาการตั้งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Commitment : UC) ผลที่ได้จากการคำนวณถูกนำมาคำนวณหาเส้นโค้งราคา (Cost Curve) จากข้อมูลราคาเสนอขายของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าในตลาดเสรีเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดทำให้ทราบถึงปริมาณกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละสายส่ง ขนาดและมุมแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นนำข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระคำนวณหาราคากลาง (Market Clearing Price) เพื่อใช้สำหรับการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ โดยศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระให้ความสำคัญที่ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบต้องมีค่าน้อยที่สุด

1. วิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี

ฟังก์ชันเป้าหมายในการคำนวณ คือ การทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบมีค่าต่ำที่สุดซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายในระบบและค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าสำรอง สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Min } C_{\text{Total}} = C_{\text{Energy}} + C_{\text{Reserve}} \quad (1)$$

เมื่อ

$$C_{\text{Energy}} = \sum_{i \in I_{\text{Gen}}} C_i^P (P_{G_i}^P) + \sum_{i \in I_{\text{Gen}}} C_i^B (P_{G_i}^B) \quad ; i \in I_{\text{Gen}} \quad (2)$$

$$C_{\text{Reserve}} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in I_{RU}} C_i^{RU} (RU_{G_i}) + \sum_{i \in I_{SP}} C_i^{SP} (SP_{G_i}) \\ + \sum_{i \in I_{NS}} C_i^{NS} (NS_{G_i}) + \sum_{i \in I_{RD}} C_i^{RD} (RD_{G_i}) \end{array} \right\} \quad ; i \in I_{\text{Gen}} \quad (3)$$

โดยค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายในระบบประกอบด้วยค่าใช้จ่ายจากการซื้อขายไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคีสามารถพิจารณาจากสมการที่ (2) และค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบประกอบด้วยค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม แบบเดินเครื่อง แบบไม่เดินเครื่องและแบบปรับลด แสดงดังสมการที่ (3)

เงื่อนไขสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส  $i$  แสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$P_i(V_i, \delta_i) = P_{G_i} - P_{D_i} \quad ; i \in I_{Bus} \quad (4)$$

$$Q_i(V_i, \delta_i) = Q_{G_i} - Q_{D_i} \quad ; i \in I_{Bus} \quad (5)$$

เงื่อนไขพิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$  ซึ่งผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าสำรองต้องมีค่าไม่เกินค่าพิกัดสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสนั้นๆ ดังสมการที่ (6)

$$P_{G_i} + RU_{G_i} + SP_{G_i} + NS_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (6)$$

เงื่อนไขพิกัดต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$  ซึ่งกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการปรับลดจากกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับลดต้องมีค่าไม่น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าตามสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีที่ได้ตกลงกันไว้ แสดงดังสมการที่ (7)

$$P_{G_i}^B \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (7)$$

เงื่อนไขพิกัดสูงสุดและต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่บัส  $i$  แสดงได้ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (8)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad ; i \in I_{Bus} \quad (9)$$

เงื่อนไขพิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าสุทธิต่อโหนดในสายส่ง  $i$  ซึ่งพิจารณาเฉพาะขนาดของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เกิดขึ้นในสายส่ง ดังสมการที่ (10)

$$\left| S_{L_i}(V_i, \delta_i) \right| \leq S_{L_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Line} \quad (10)$$

เงื่อนไขพิกัดสูงสุดและต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$  ประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม แบบเดินเครื่อง แบบไม่เดินเครื่องและแบบปรับลด ตามสมการที่ (11)-(14) ตามลำดับ

$$0 \leq RU_{G_i} \leq RU_{G_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (11)$$

$$0 \leq SP_{G_i} \leq SP_{G_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (12)$$

$$0 \leq NS_{G_i} \leq NS_{G_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (13)$$

$$0 \leq RD_{G_i} \leq RD_{G_i}^{\max} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (14)$$

เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส โดยผลรวมของกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$  ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองแต่ละประเภทในระบบประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม แบบเดินเครื่อง แบบไม่เดินเครื่องและแบบปรับลด ตามสมการที่ (15)-(18) ตามลำดับ

$$R^{RU} \leq \sum_i RU_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (15)$$

$$R^{SP} \leq \sum_i SP_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (16)$$

$$R^{NS} \leq \sum_i NS_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (17)$$

$$R^{RD} \leq \sum_i RD_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (18)$$

เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบ โดยพิจารณาจากผลรวมของอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบปรับเพิ่ม ( $RU_{G_i}$ ) และอัตราความชันของกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบปรับเพิ่มของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$  ( $RR_{G_i}^{RU}$ ) กับอัตราส่วนผลรวมของกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบเดินเครื่อง ( $SP_{G_i}$ ) และแบบไม่เดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$  ( $NS_{G_i}$ ) และอัตราความชันของผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าสำรองจริงแบบเดินเครื่องและแบบไม่เดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$  ( $RR_{G_i}^{OP}$ ) ต้องมีค่าไม่เกินภายในเวลา 10 นาที ตามสมการที่ (19)

$$\frac{RU_{G_i}}{RR_{G_i}^{RU}} + \frac{SP_{G_i} + NS_{G_i}}{RR_{G_i}^{OP}} \leq 10 \quad ; i \in I_{Gen} \quad (19)$$

เงื่อนไขสมการรายได้ โดยพิจารณาจากรายได้ทั้งหมดของผู้ขายไฟฟ้าประกอบด้วยรายได้จากการขายไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลาง แบบทวิภาคีและกำลังไฟฟ้าสำรอง ตามสมการที่ (20)

$$R_{G_i}^{Total} = R_{G_i}^P + R_{G_i}^B + R_{G_i}^R \quad ; i \in I_{Gen} \quad (20)$$

โดยรายได้ทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าสำรองประกอบด้วยรายได้กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม แบบเดินเครื่อง แบบไม่เดินเครื่องและแบบปรับลด ตามสมการที่ (21)

$$R_{G_i}^R = R_{G_i}^{RU} + R_{G_i}^{SP} + R_{G_i}^{NS} + R_{G_i}^{RD} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (21)$$

ในทำนองเดียวกันเงื่อนไขสมการรายจ่ายทั้งหมดของผู้ซื้อไฟฟ้าประกอบด้วยรายจ่ายจากการซื้อไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลาง แบบทวิภาคีและกำลังไฟฟ้าสำรอง ตามสมการที่ (22)

$$E_{D_j}^{Total} = E_{D_j}^P + E_{D_j}^B + E_{D_j}^R \quad ; j \in I_{Load} \quad (22)$$

โดยรายจ่ายทั้งหมดของกำลังไฟฟ้าสำรองประกอบด้วยรายจ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่ม แบบเดินเครื่อง แบบไม่เดินเครื่องและแบบปรับลด ตามสมการที่ (23)

$$E_{D_j}^R = E_{D_j}^{RU} + E_{D_j}^{SP} + E_{D_j}^{NS} + E_{D_j}^{RD} \quad ; j \in I_{Load} \quad (23)$$

## 2. เส้นโค้งราคา (Cost Curve)

เมื่อทราบข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จะซื้อขายในระบบแล้ว ข้อมูลที่จำเป็นก่อนวิเคราะห์ระบบด้วยหลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด คือ เส้นโค้งราคา ซึ่งได้จากราคาขายที่ผู้ผลิตเสนอราคา กำลังไฟฟ้าในรูปแบบตารางข้อมูลให้กับตลาดกลาง โดยตารางดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับราคาไฟฟ้าที่ผลิตได้ดังตารางที่ 1 โดยข้อมูลชุดนี้ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระเป็นผู้มีหน้าที่ทดสอบระบบที่มีการตกลงซื้อขายกำลังไฟฟ้าเพื่อทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพหรือข้อจำกัดของระบบ เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาในระบบ เพราะหากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระสั่งให้ระบบทำงานตามข้อมูลราคาเสนอขายที่ผู้ผลิตเสนอขาย โดยไม่คำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ของระบบแล้ว อาจทำให้ระบบไม่สามารถรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเส้นโค้งราคาของผู้ผลิต เพื่อนำไปเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)

การคำนวณหาเส้นโค้งราคา เริ่มจากการนำข้อมูลราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ช่วง ดังตารางที่ 1 และนำไปหาพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละช่วงกำลังไฟฟ้า ดังภาพที่ 4 เพื่อหาค่าใช้จ่ายของการผลิตกำลังไฟฟ้า ดังตารางที่ 1 ราคาแต่ละช่วงนี้ถูกนำไปสร้างเส้นกราฟ เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าใช้จ่ายซึ่งอยู่ในรูปสมการพหุนามกำลัง 2 (Polynomial) ตามสมการที่ (24)

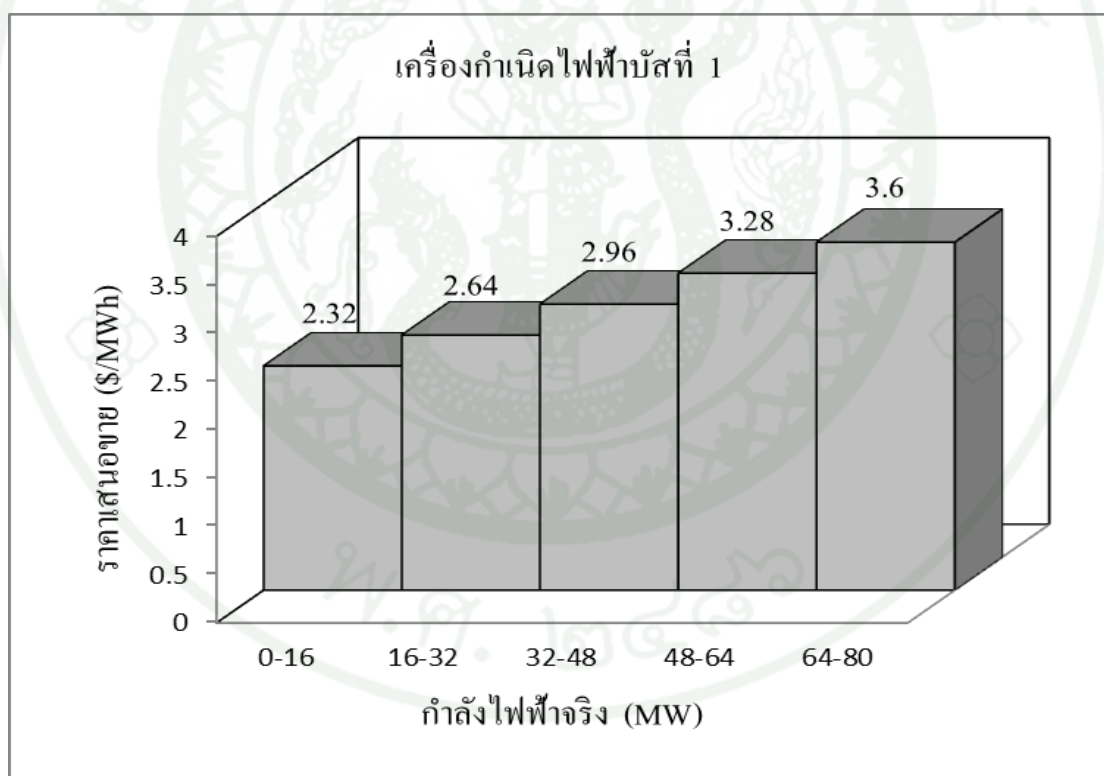
$$C_i = a_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + c_i \quad ; i \in I_{Gen} \quad (24)$$

จากภาพที่ 5 จะได้สมการเส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 ดังสมการที่ (25) ซึ่งสมการเส้นโค้งราคาที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด

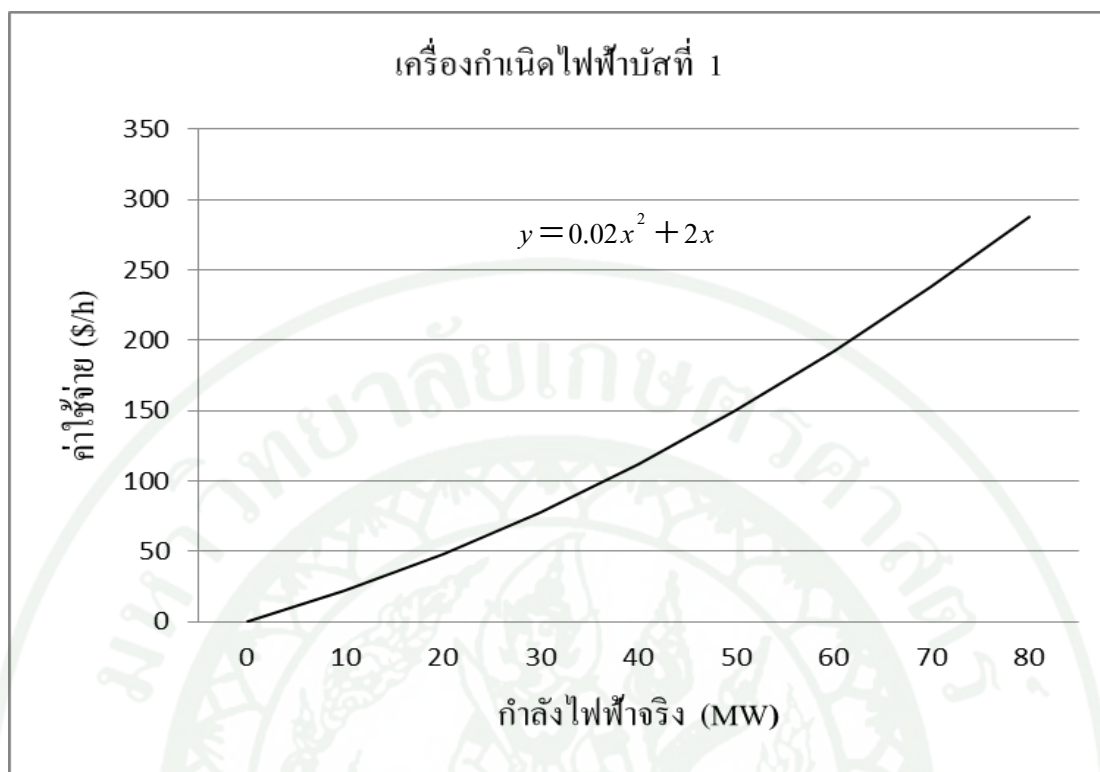
$$C_i = 0.02 P_{G_i}^2 + 2 P_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (25)$$

ตารางที่ 1 ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
0 - 16	2.32	37.12
16 - 32	2.64	84.48
32 - 48	2.96	142.08
48 - 64	3.28	209.92
64 - 80	3.60	288.00



ภาพที่ 4 ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1

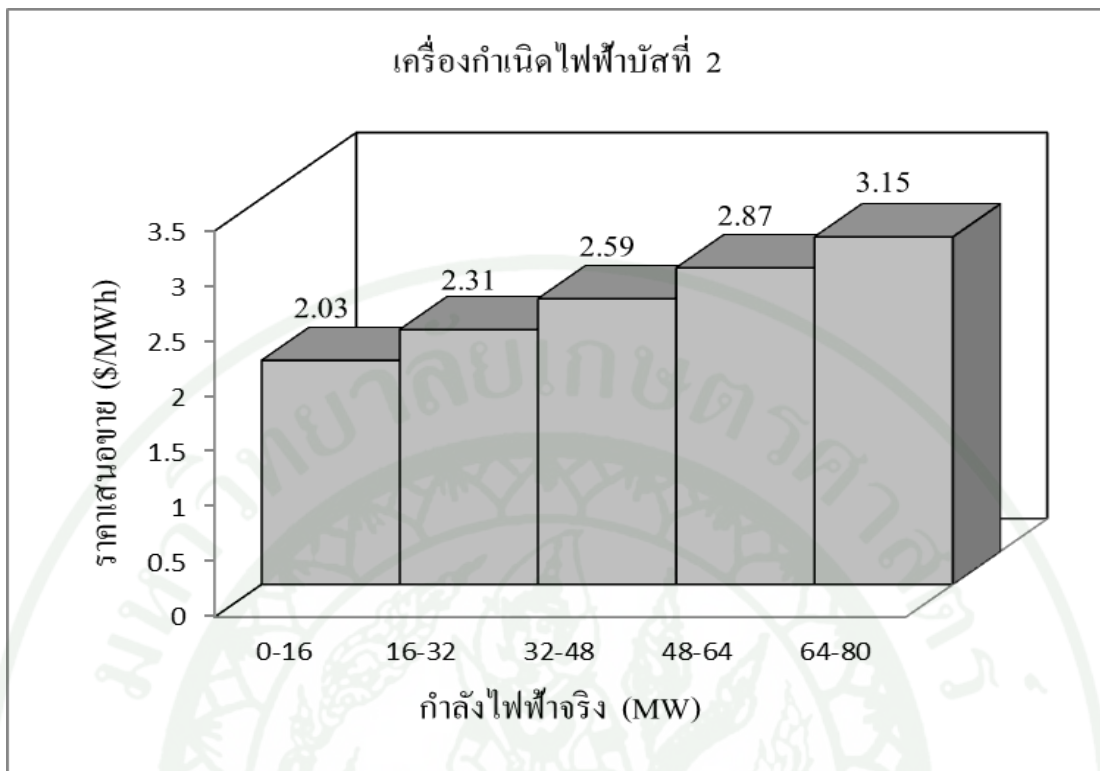


**ภาพที่ 5** การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1

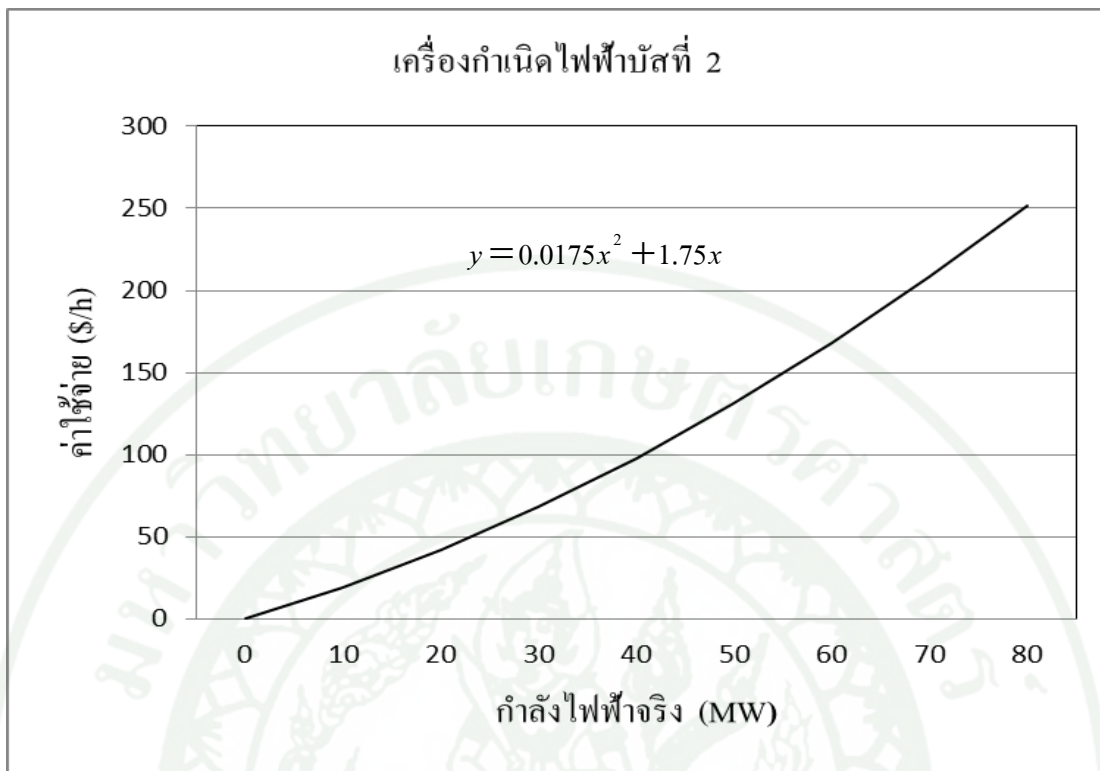
วิธีการหาสมการเส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าข้างต้น จะถูกนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 2 13 22 23 และ 27 ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 2** ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
0 – 16	2.03	32.48
16 – 32	2.31	73.92
32 – 48	2.59	124.32
48 – 64	2.87	183.68
64 – 80	3.15	252.00



ภาพที่ 6 ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2



ภาพที่ 7 การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2

จากภาพที่ 7 จะได้สมการเส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2

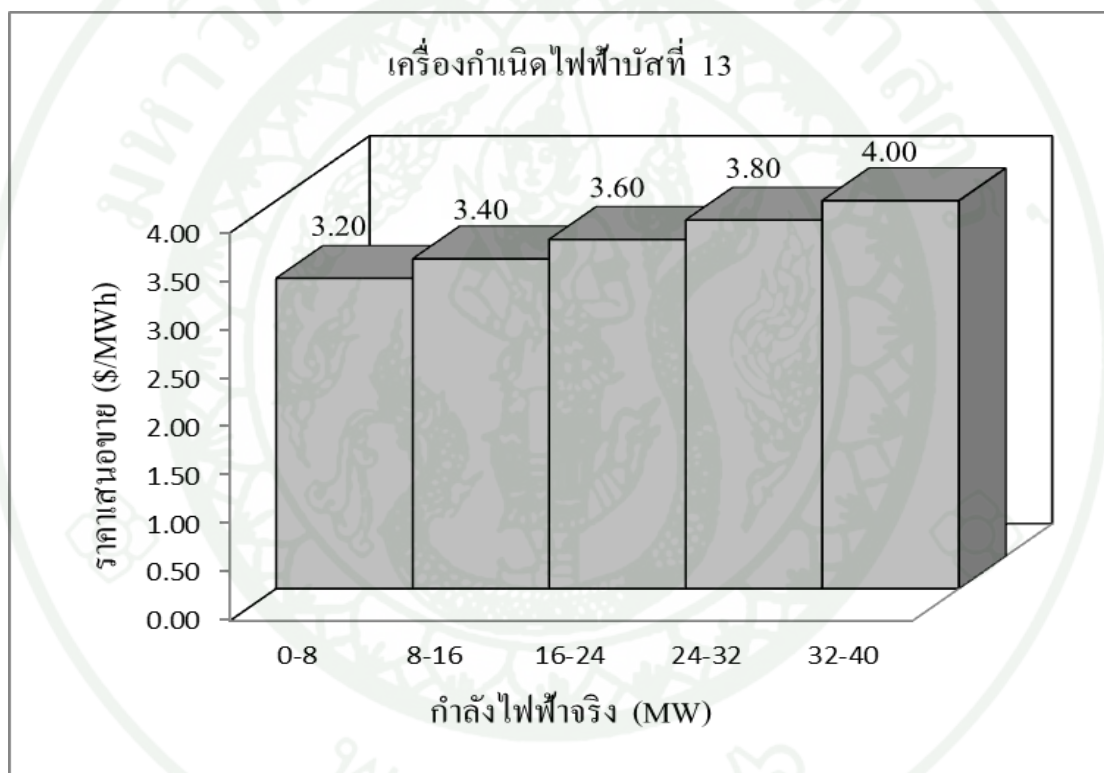
$$C_i = 0.0175P_{G_i}^2 + 1.75P_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (26)$$

ตารางที่ 3 ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13

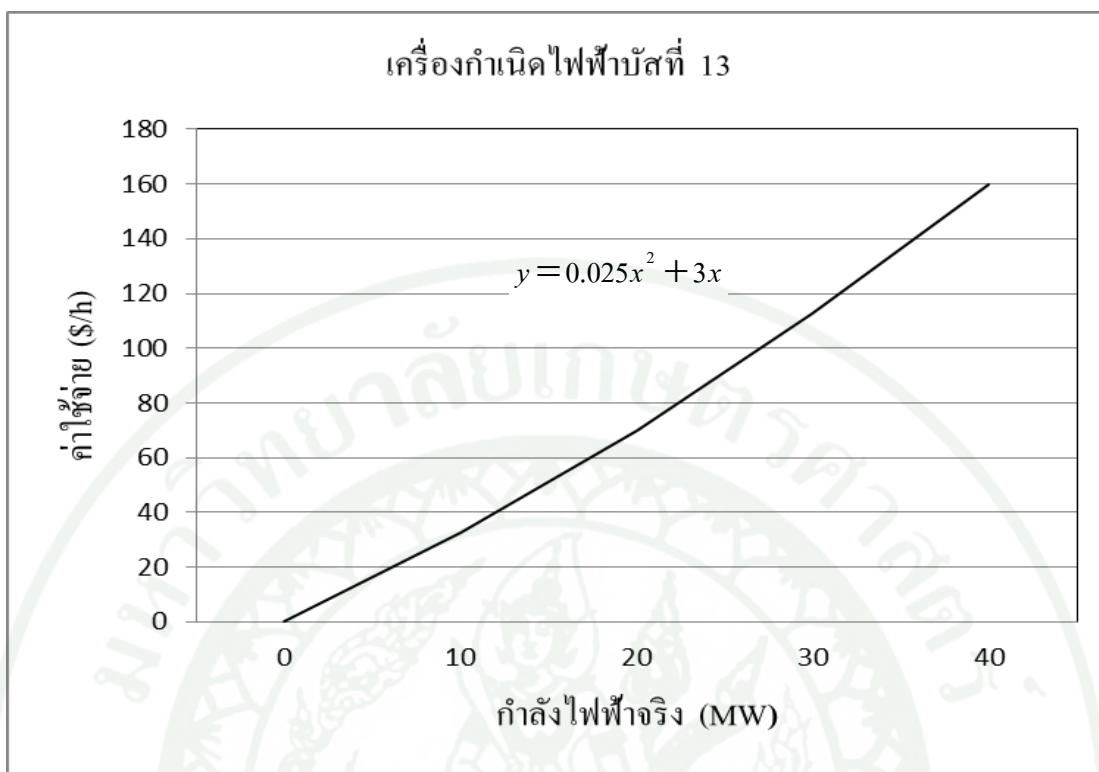
กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
0 - 8	3.20	25.60
8 - 16	3.40	54.40
16 - 24	3.60	86.40

ตารางที่ 3 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
24 - 32	3.80	121.60
32 - 40	4.00	160.00



ภาพที่ 8 ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13



**ภาพที่ 9** การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13

จากภาพที่ 9 จะได้สมการเส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13

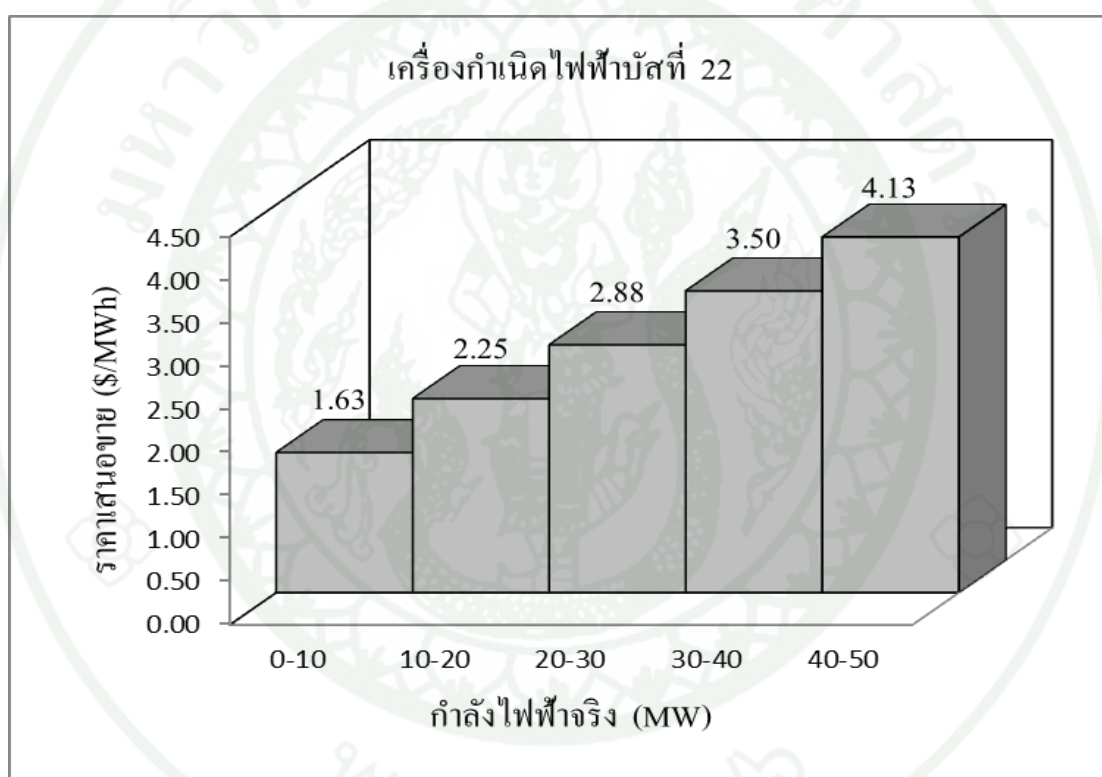
$$C_i = 0.025P_{G_i}^2 + 3P_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (27)$$

**ตารางที่ 4** ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 22

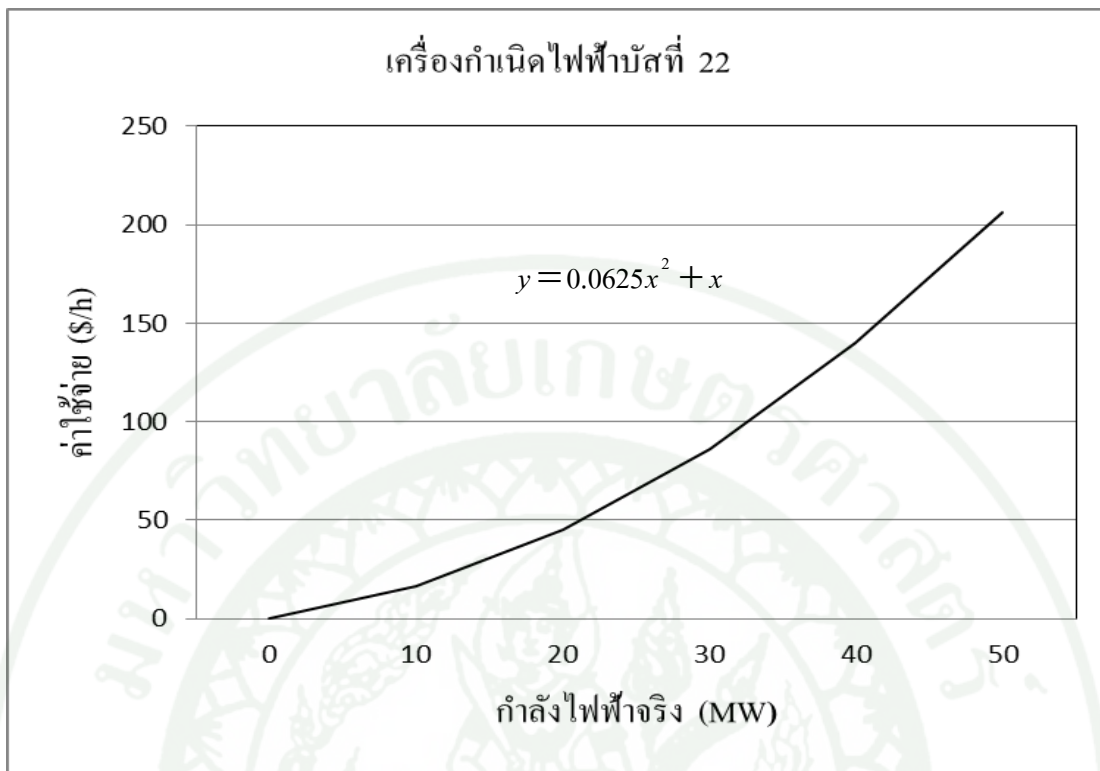
กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
0 - 10	1.63	16.25
10 - 20	2.25	45.00
20 - 30	2.88	86.25

ตารางที่ 4 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
30 - 40	3.50	140.00
40 - 50	4.13	206.25



ภาพที่ 10 ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 22



ภาพที่ 11 การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ยของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 22

จากภาพที่ 11 จะได้สมการเส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 22

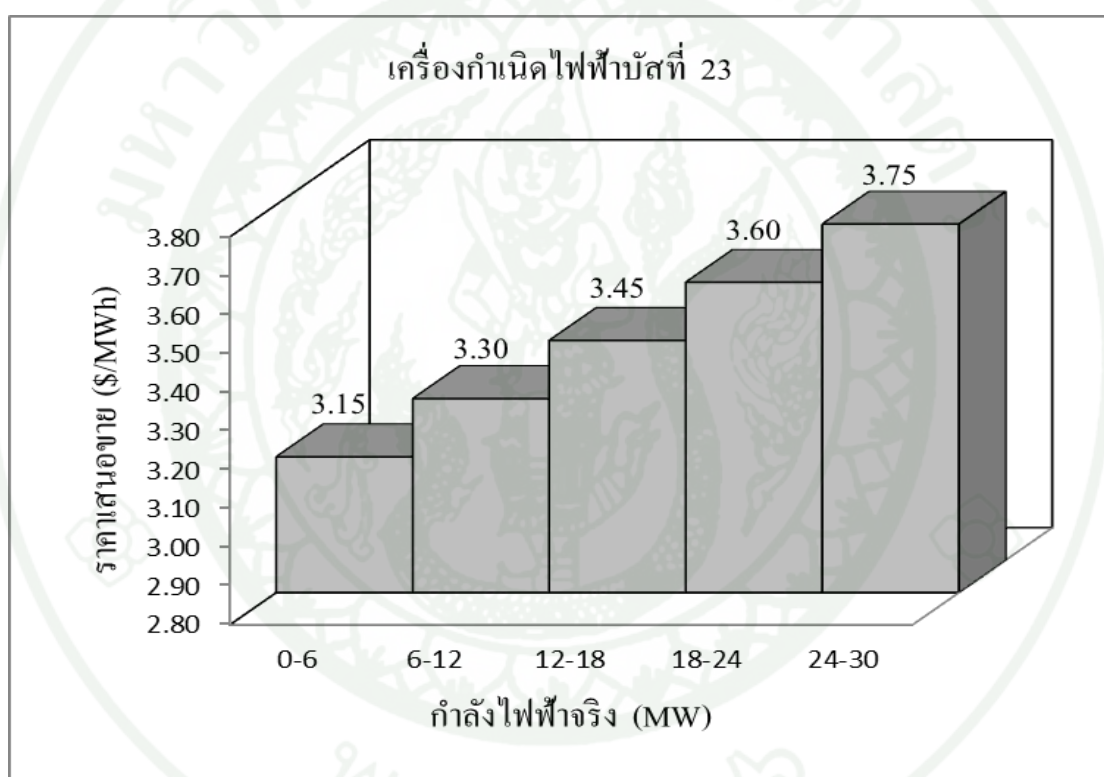
$$C_i = 0.0625P_{G_i}^2 + 1P_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (28)$$

ตารางที่ 5 ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 23

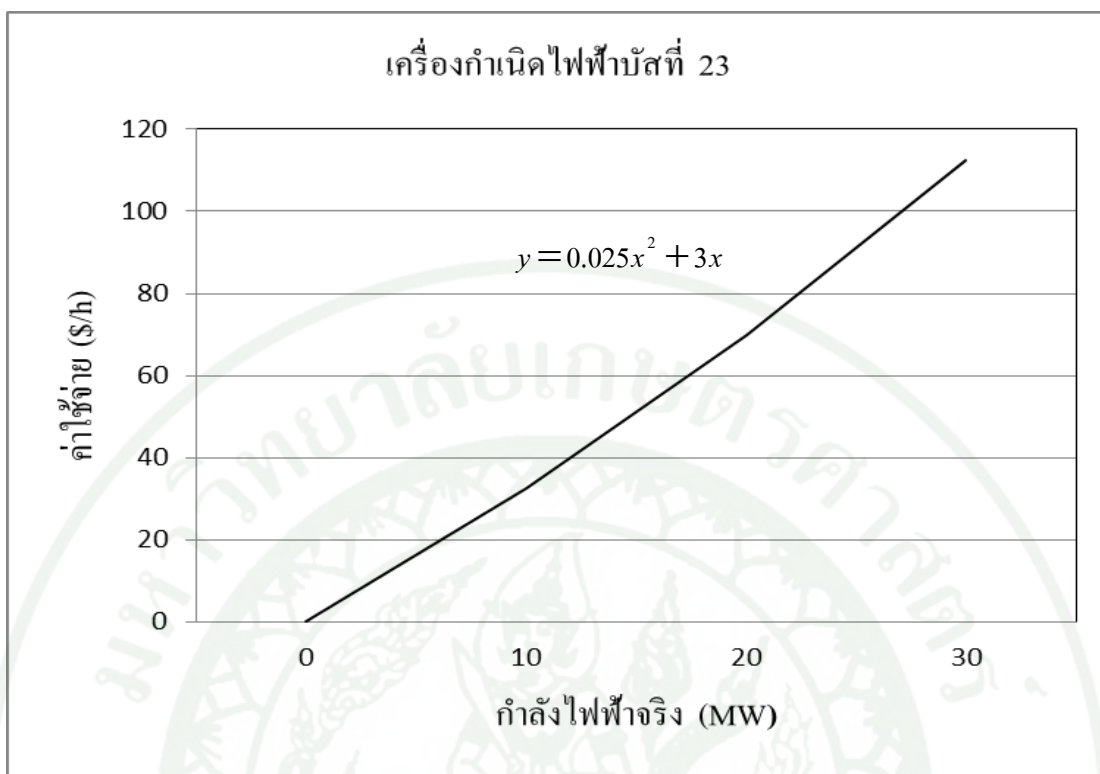
กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่ย (\$/h)
0 - 6	3.15	18.9
6 - 12	3.30	39.6
12 - 18	3.45	62.1

ตารางที่ 5 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
18 - 24	3.60	86.4
24 - 30	3.75	112.5



ภาพที่ 12 ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 23



**ภาพที่ 13** การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 23

จากภาพที่ 13 จะได้สมการเส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 23

$$C_i = 0.025P_{G_i}^2 + 3P_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (29)$$

**ตารางที่ 6** ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 27

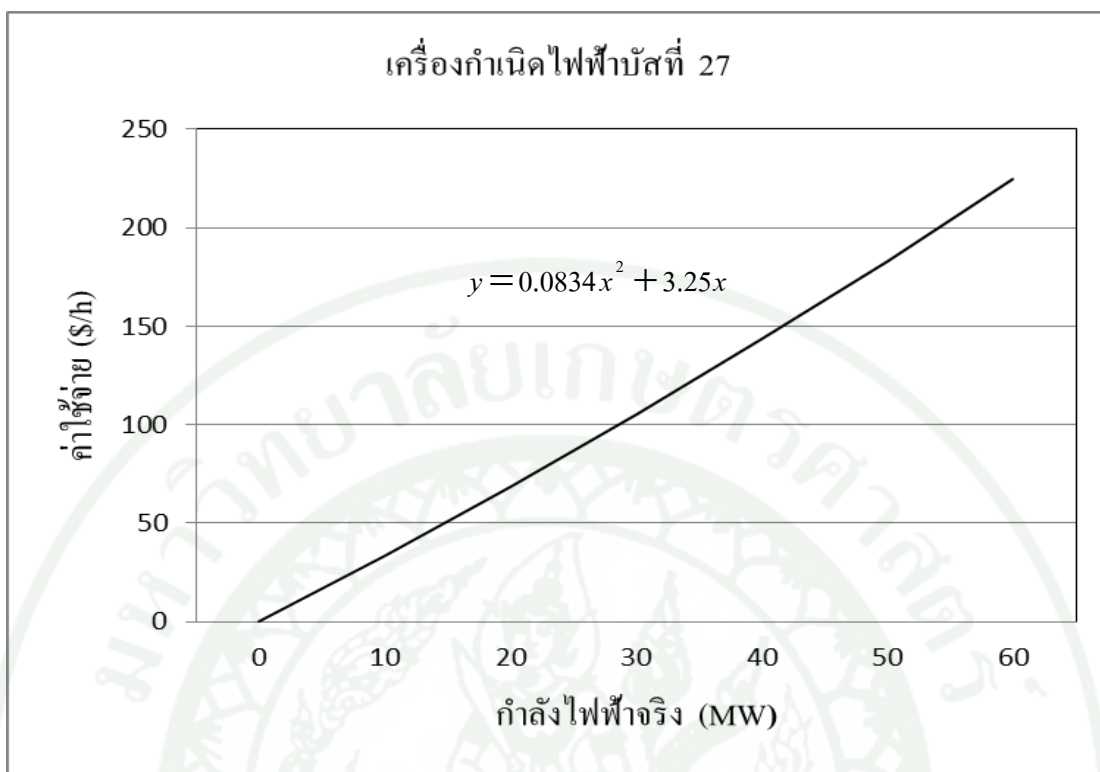
กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
0 - 11	3.34	36.76
11 - 22	3.43	75.54
22 - 33	3.53	116.33

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	ราคาเสนอขาย (\$/MWh)	ค่าใช้จ่าย (\$/h)
33 - 44	3.62	159.15
44 - 55	3.71	203.98



ภาพที่ 14 ราคาเสนอขายต่อ MW ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 27



ภาพที่ 15 การหาสมการเส้นโค้งราคาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายของการผลิตกับปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 27

จากภาพที่ 15 จะได้สมการเส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 27

$$C_i = 0.00834P_{G_i}^2 + 3.25P_{G_i} \quad ; i \in I_{Gen} \quad (30)$$

## ผลและวิจารณ์

### ผล

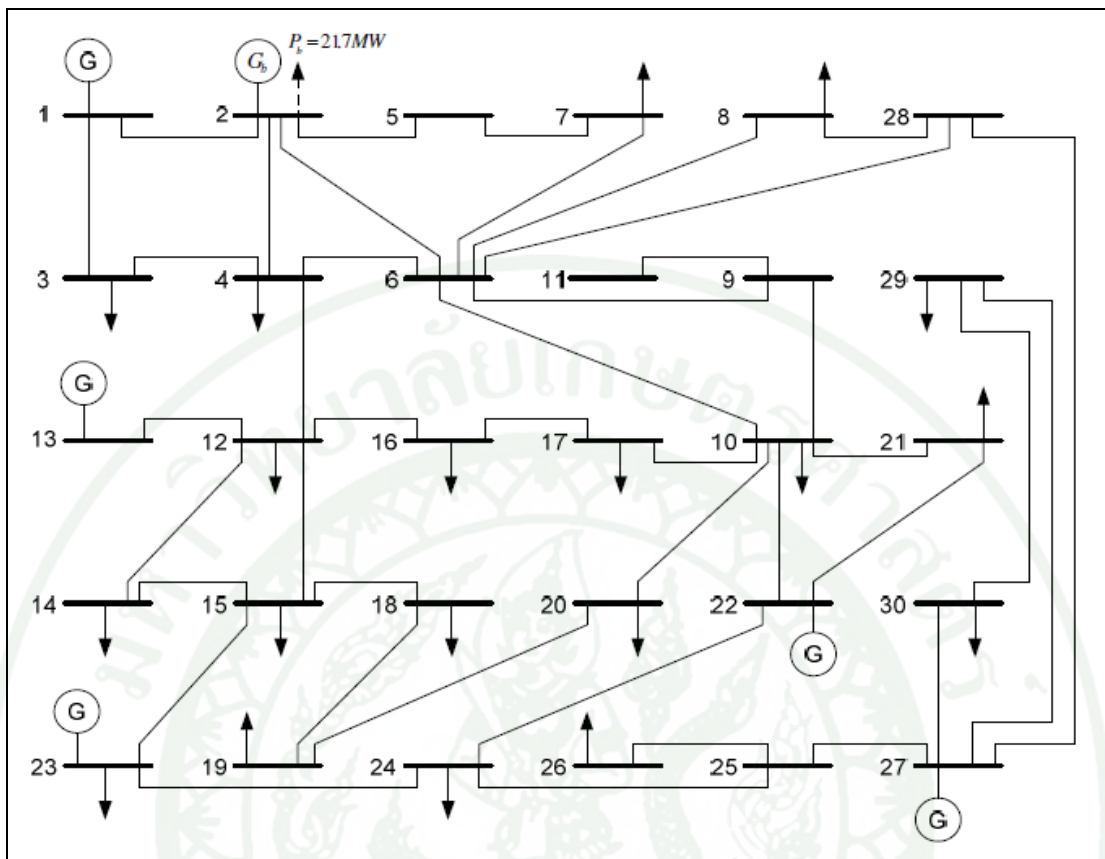
การศึกษาได้ใช้โปรแกรม MATLAB เขียนโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด เมื่อระบบมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี นำมาทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัสที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง ติดตั้งอยู่บัสที่ 1 2 13 22 23 และ 27 โดยระบบประกอบด้วยสายส่งจำนวน 41 เส้นและมีโหลดรวมทั้งหมด 189.2 MW โดยเฉพาะบัสที่ 2 มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2 ไปยังโหลดบัสที่ 2 อยู่ 21.7 MW ดังภาพที่ 16

ในงานวิจัยแบ่งเป็นกรณีศึกษา 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ศึกษาที่ 1 ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองไว้ในระบบ โดยผู้ซื้อและผู้ขายทำการซื้อขายผ่านตลาดกลางและทวิภาคีเท่านั้น (แสดงในตารางที่ 7)

กรณีที่ศึกษาที่ 2 ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรอง 1 เท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (80 MW) ซึ่งประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องและไม่เดินเครื่อง 40 และ 40 MW ตามลำดับ ในส่วนของกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุมต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3% ของโหลดรวมทั้งหมดประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่มและปรับลดอย่างละ 6 MW (แสดงในตารางที่ 7 8 9 และ 10)

กรณีที่ศึกษาที่ 3 ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรอง 1 เท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (80 MW) ซึ่งประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่องและไม่เดินเครื่อง 40 และ 40 MW ตามลำดับ ในส่วนของกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุมต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3% ของโหลดรวมทั้งหมดประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าสำรองแบบปรับเพิ่มและปรับลดอย่างละ 6 MW โดยราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ปรับเพิ่มขึ้น 10 เท่า (แสดงในตารางที่ 7 8 9 และ 10)



ภาพที่ 16 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ตารางที่ 7 พิกัดต่ำสุด สูงสุดและราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัส	กำลังไฟฟ้าจริง		ราคาเสนอขาย		
	$P_{G_i}^{\min}$ (MW)	$P_{G_i}^{\max}$ (MW)	a (\$/MW <sup>2</sup> h)	b (\$/MWh)	c (\$/h)
1	-	80	0.02000	2.00	-
2	-	80	0.01750	1.75	-
13	-	40	0.02500	3.00	-
22	-	50	0.06250	1.00	-
23	-	30	0.02500	3.00	-
27	-	55	0.00384	3.25	-

ตารางที่ 8 พิกัดสูงสุดและราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัส	กำลังไฟฟ้าสำรอง							
	พิกัดสูงสุด (MW)				ราคาเสนอขาย (\$/MWh)			
	$SP_{G_i}^{\max}$	$NS_{G_i}^{\max}$	$RU_{G_i}^{\max}$	$RD_{G_i}^{\max}$	$C_i^{SP}$	$C_i^{NS}$	$C_i^{RU}$	$C_i^{RD}$
1	15	20	3	3	2	1	3	3
2	15	20	6	6	3	1.5	5	4
13	10	10	2	2	6	3.5	8	6
22	10	10	2	2	3.5	3	4	7
23	5	5	3	3	5	2.5	6.5	5.5
27	5	10	2	2	4	2	6	5

ตารางที่ 9 ข้อมูลการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบภายใต้กฎเกณฑ์ที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์คและแคลิฟอร์เนีย

กรณีศึกษา	ความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบ (MW)			
	$R^{SP}$	$R^{NS}$	$R^{RU}$	$R^{RD}$
1	-	-	-	-
2 และ 3	40	40	6	6

ตารางที่ 10 ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2 และ 3

บัส	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรอง (\$/MWh)							
	กรณีศึกษาที่ 2				กรณีศึกษาที่ 3			
	$C_i^{SP}$	$C_i^{NS}$	$C_i^{RU}$	$C_i^{RD}$	$C_i^{SP}$	$C_i^{NS}$	$C_i^{RU}$	$C_i^{RD}$
1	2	1	3	3	20	10	30	30
2	3	1.5	5	4	3	1.5	5	4
13	6	3.5	8	6	6	3.5	8	6
22	3.5	3	4	7	3.5	3	4	7
23	5	2.5	6.5	5.5	5	2.5	6.5	5.5

ตารางที่ 10 (ต่อ)

ปี	ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรอง (\$/MWh)							
	กรณีศึกษาที่ 2				กรณีศึกษาที่ 3			
	$C_i^{SP}$	$C_i^{NS}$	$C_i^{RU}$	$C_i^{RD}$	$C_i^{SP}$	$C_i^{NS}$	$C_i^{RU}$	$C_i^{RD}$
27	4	2	6	5	4	2	6	5

ผลจากการคำนวณหาค่าการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ตามสมการที่ (1)-(24) ของกรณีศึกษาทั้งหมด ได้ผลตามตารางดังต่อไปนี้

1. กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบซึ่งประกอบด้วย กรณีศึกษาที่มีสัญญาซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง แบบทวิภาคีและการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองของทุกกรณีศึกษา (แสดงในตารางที่ 11)

2. ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคีรวมถึงค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองของทุกกรณีศึกษา (แสดงในตารางที่ 12)

สามารถพิจารณาผลการวิจัยได้ดังนี้

ผลจากการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 เนื่องจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองไว้ในระบบ โดยผู้ซื้อและผู้ขายทำการซื้อขายผ่านตลาดกลางและทวิภาคี โดยเกิดสถานะเต็มพิกัดขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดบัสที่ 8 และสูงสุดบัสที่ 13 และ 27 ตามเงื่อนไขสมการที่ (9) และเกิดสถานะเต็มพิกัดสายส่งเส้นที่ 10 29 และ 35 ซึ่งประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจากบัสที่ 6 22 และ 27 ไปบัสที่ 8 21 และ 25 ตามลำดับตามเงื่อนไขสมการที่ (10) ส่งผลกระทบต่อระบบโดยทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากสถานะดังกล่าวทำให้ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องพิจารณาซื้อกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาเสนอขายเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ผู้ขายไฟฟ้าได้กำไรเพิ่มขึ้นแต่ผู้ซื้อไฟฟ้าต้องจ่ายเงินมากขึ้นในการซื้อไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง

ผลจากการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 เนื่องจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองไว้ในระบบ ซึ่งประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสำรองแบบเดินเครื่อง ไม่เดินเครื่อง ปรับเพิ่มและปรับลดอยู่ 40 40 6 และ 6 MW ตามลำดับ ส่งผลกระทบต่อระบบโดยทำให้กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 และ 2 ลดลงเพราะถูกจองด้วยการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองแต่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 13 22 23 และ 27 เพิ่มขึ้น โดยราคาเสนอขายของบัสที่ 13 22 23 และ 27 มีราคาเสนอขายมากกว่า ดังนั้นค่าใช้จ่ายของกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายในระบบแบบผ่านตลาดกลางเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $558.58-556.34 = 2.24$  \$/h ค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรอง 203.69 \$/h และค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $783.97-578.04 = 205.93$  \$/h คิดเป็น 35.63% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบกรณีศึกษาที่ 1

ในกรณีศึกษานี้เกิดภาวะเต็มพิกัดขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดบัสที่ 27 ตามเงื่อนไขข้อสมการที่ (9) แต่ภาวะเต็มพิกัดของสายส่งไม่เกิดในกรณีศึกษานี้เพราะว่าเนื่องจากการมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองทำให้ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องพิจารณาซื้อไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาเสนอขายที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบสูงขึ้น และเกิดภาวะเต็มพิกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 และ 2 ตามเงื่อนไขข้อสมการที่ (6) เพราะเนื่องจากการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองได้ของกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 และ 2 ไว้ก่อนล่วงหน้าซึ่งราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของบัสที่ 1 และ 2 มีราคาน้อยกว่าบัสอื่นๆในระบบ

ผลจากการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 เนื่องจากราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 มีราคาสูงขึ้น 10 เท่าของราคาในกรณีศึกษาที่ 2 (แสดงในตารางที่ 4) ทำให้ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องพิจารณาซื้อกำลังไฟฟ้าสำรองจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองที่มีราคาสูงกว่าราคาของกรณีศึกษาที่ 2 ดังนั้นส่งผลกระทบต่อทั้งค่าใช้จ่ายระบบซึ่งประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคีเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $582.96-580.28 = 2.68$  \$/h คิดเป็น 0.46% ของค่าใช้จ่ายการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคีในกรณีศึกษาที่ 2 ค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $285.55-203.69 = 81.59$  \$/h คิดเป็น 40% ของค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองในกรณีศึกษาที่ 2 และค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $868.51-783.97 = 84.54$  \$/h คิดเป็น 10.78% ของค่าใช้จ่ายในกรณีศึกษาที่ 2 ดังนั้นการปรับราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อระบบทั้งหมด โดยทำให้ค่าใช้จ่ายการซื้อขายไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางเพิ่มขึ้นเพราะ

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสำรองไปจองพื้นที่กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ก่อนล่วงหน้า ทำให้ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าต้องเลือกซื้อไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาเสนอขายเพิ่มขึ้นและปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งในกรณีซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง ทวิภาคีและกำลังไฟฟ้าสำรองอยู่ในค่าพิกัดเดียวกัน

ในกรณีศึกษานี้เกิดสถานะเต็มพิกัดขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดบัสที่ 13 27 และต่ำสุดบัสที่ 8 ตามเงื่อนไขข้อสมการที่ (9) และเกิดสถานะเต็มพิกัดของสายส่งเส้นที่ 10 และ 29 ซึ่งประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจากบัสที่ 6 และ 22 ไปบัสที่ 8 และ 21 ตามลำดับ ตามเงื่อนไขข้อสมการที่ (10) ส่งผลกระทบต่อระบบ โดยทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากสถานะดังกล่าวมาทำให้ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องพิจารณาซื้อกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาเสนอขายที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผู้ขายไฟฟ้าได้กำไรมากขึ้นแต่ผู้ซื้อไฟฟ้าต้องจ่ายเงินมากขึ้นในการซื้อไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง และเกิดสถานะเต็มพิกัดสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2 ตามเงื่อนไขข้อสมการที่ (6) เพราะเนื่องจากการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองไปจองกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 2 ไว้ก่อนล่วงหน้า

การจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองมีผลกระทบต่อระบบทั้งหมด เพราะกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าสำรองและกำลังไฟฟ้าจริงอยู่ในค่าพิกัดกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดที่เดียวกัน ดังนั้นศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องให้ความสำคัญในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบแต่ทั้งนี้การเพิ่มการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองเข้ามาในระบบส่งผลกระทบทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของกำลังไฟฟ้าสำรอง ดังนั้นเพื่อความยุติธรรมต่อผู้ซื้อขายไฟฟ้าและเสถียรภาพในระบบ ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีหน้าที่จัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 11 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบของทุกกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	บัส	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)			กำลังไฟฟ้าสำรอง (MW)				
		$P_{G_i}^P$	$P_{G_i}^B$	รวม	$SP_{G_i}$	$NS_{G_i}$	$RU_{G_i}$	$RD_{G_i}$	รวม
1	1	40.37	-	40.37	-	-	-	-	-
	2	32.35	21.70	54.05	-	-	-	-	-
	13	15.89	-	15.89	-	-	-	-	-
	22	22.73	-	22.73	-	-	-	-	-

ตารางที่ 11 (ต่อ)

กรณีศึกษา	ปี	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)			กำลังไฟฟ้าสำรอง (MW)				
		$P_{G_i}^P$	$P_{G_i}^B$	รวม	$SP_{G_i}$	$NS_{G_i}$	$RU_{G_i}$	$RD_{G_i}$	รวม
1	23	16.62	-	16.62	-	-	-	-	-
	27	42.51	-	42.51	-	-	-	-	-
	รวม	170.47	21.70	192.17	-	-	-	-	-
2	1	42.00	-	42.00	15.00	20.00	3.00	3.00	38.00
	2	23.68	21.70	45.38	15.00	18.62	1.00	3.00	34.62
	13	18.82	-	18.82	-	-	-	-	-
	22	23.75	-	23.75	10.00	-	2.00	-	12.00
	23	18.34	-	18.34	-	-	-	-	-
	27	43.67	-	43.67	-	1.38	-	-	1.38
	รวม	170.26	21.70	191.96	40.00	40.00	6.00	6.00	86.00
3	1	44.84	-	44.84	-	-	-	-	-
	2	19.30	21.70	41.00	15.00	20.00	4.00	6.00	39.00
	13	20.47	-	20.47	5.00	-	-	-	5.00
	22	24.63	-	24.63	10.00	6.05	2.00	-	18.05
	23	20.00	-	20.00	5.00	5.00	-	-	10.00
	27	41.05	-	41.05	5.00	8.95	-	-	13.95
	รวม	170.29	21.70	191.99	40.00	40.00	6.00	6.00	86.00

ตารางที่ 12 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบของทุกกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	ปี	ค่าใช้จ่าย (\$/h)							
		กำลังไฟฟ้าจริง			กำลังไฟฟ้าสำรอง				
		ตลาดกลาง	ทวิภาคี	รวม	เดินเครื่อง	ไม่เดินเครื่อง	ปรับเพิ่ม	ปรับลด	รวม
1	1	113.34	-	113.34	-	-	-	-	-
	2	124.01	21.70	145.71	-	-	-	-	-

ตารางที่ 12 (ต่อ)

กรณีศึกษา	ปี	ค่าใช้จ่าย (\$/h)							รวม
		กำลังไฟฟ้าจริง			กำลังไฟฟ้าสำรอง				
		ตลาดกลาง	ทวิภาคี	รวม	เดินเครื่อง	ไม่เดินเครื่อง	ปรับเพิ่ม	ปรับลด	
1	13	53.99	-	53.99	-	-	-	-	-
	22	55.04	-	55.04	-	-	-	-	-
	23	56.75	-	56.75	-	-	-	-	-
	27	153.22	-	153.22	-	-	-	-	-
	รวม	556.34	21.70	578.04	-	-	-	-	-
2	1	119.28	-	119.28	30.00	20.00	9.00	9.00	68.00
	2	93.77	21.70	115.47	45.00	27.92	5.00	12.00	89.92
	13	65.30	-	65.30	-	-	-	-	-
	22	58.99	-	58.99	35.00	-	8.00	-	43.00
	23	63.43	-	63.43	-	-	-	-	-
	27	157.82	-	157.82	-	2.77	-	-	2.77
รวม	558.58	21.70	580.28	110.00	50.69	22.00	21.00	203.69	
3	1	-	-	129.90	-	-	-	-	-
	2	79.47	21.70	101.17	45.00	30.00	20.00	24.00	119.00
	13	71.87	-	71.87	30.00	-	-	-	30.00
	22	62.55	-	62.55	35.00	18.16	8.00	-	61.16
	23	70.00	-	70.00	25.00	12.50	-	-	37.50
	27	147.47	-	147.47	20.00	17.90	-	-	37.90
รวม	561.26	21.70	582.96	155.00	78.55	28.00	24.00	285.55	

## วิจารณ์

จากการศึกษาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีและแบบผ่านตลาดกลาง พบว่า ปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบแปรผันตรงกับค่าใช้จ่ายสำหรับการผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ แต่ปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองแปรผกผันกับปริมาณการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคีเพราะเป็นการแย่งพื้นที่กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระพิจารณาจัดสรรกำลังไฟฟ้าจากราคาเสนอขายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาต่ำที่สุดก่อน ตามตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3 เปรียบเทียบกัน เมื่อศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองเพิ่มเข้ามาในระบบส่งผลให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคี ดังนั้นเพื่อความยุติธรรมต่อทั้งผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าในระบบทั้งหมด ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องกำหนดกฎเกณฑ์ในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุด

ผลจากกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 เนื่องจากราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า巴士ที่ 1 มีราคาสูงขึ้น 10 เท่าของราคาในกรณีศึกษาที่ 2 ทำให้ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องพิจารณาซื้อกำลังไฟฟ้าสำรองจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองเพิ่มขึ้น ดังนั้นส่งผลกระทบต่อทั้งค่าใช้จ่ายทั้งระบบซึ่งประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคีเพิ่มขึ้นและค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองเพิ่มขึ้นด้วย เพราะการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองไปจองพื้นที่กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ก่อนล่วงหน้าโดยปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งในกรณีซื้อขายแบบผ่านตลาดกลาง ทวิภาคีและกำลังไฟฟ้าสำรองอยู่ในค่าพิกัดเดียวกัน ดังนั้นศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องพิจารณาราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าสำรองที่มีค่าน้อยที่สุดรวมไปถึงพิจารณาปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองในระบบภายใต้กฎเกณฑ์ของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวออร์คและแคลิฟอร์เนีย เพื่อให้ระบบมีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดและมีเสถียรภาพมากที่สุด

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ ศึกษาการจัดสรรปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่มีสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคีและแบบผ่านตลาดกลาง โดยการเพิ่มตัวแปรกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบในฟังก์ชันเป้าหมายและเพิ่มเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสำรองแบบควบคุม แบบเดินเครื่องและแบบไม่เดินเครื่อง ภายใต้ข้อกำหนดซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกฎเกณฑ์ในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรอง โดยใช้หลักการวิเคราะห์หาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ซึ่งทำการศึกษาผ่านระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ภายใต้กฎเกณฑ์ที่นำมาจากศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระนิวยอร์ก (NYISO) และแคลิฟอร์เนีย (CAISO) ผลที่ได้จากการศึกษาทำให้ทราบถึงปริมาณกำลังการผลิตและปริมาณกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละสายส่ง ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่น้อยที่สุดของระบบซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายการซื้อขายกำลังไฟฟ้าทั้งกรณีผ่านตลาดกลางและทวิภาคีรวมถึงค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองเพื่อให้เกิดความยุติธรรมที่สุดต่อผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าในระบบแต่ทั้งนี้การเพิ่มการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองเข้ามาในระบบส่งผลกระทบต่อทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของกำลังไฟฟ้าสำรอง ดังนั้นศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระมีหน้าที่จัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดและมีเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินระบบสามารถลดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุด

### ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบในตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรีที่มีสัญญาซื้อขายแบบผ่านตลาดกลางและแบบทวิภาคี โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด เพื่อให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นการศึกษาต่อไปสามารถเพิ่มการศึกษาคิดราคาของกำลังไฟฟ้าสำรองด้วยวิธีอื่นเพื่อลดค่าใช้จ่ายของระบบให้น้อยลงและทำให้เกิดความยุติธรรมมากที่สุดต่อผู้ซื้อและผู้ขายทั้งหมดภายใต้กฎเกณฑ์ของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระและการจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อระบบทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ทางศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระต้องตัดสินใจว่าควรจัดสรรกำลังไฟฟ้าสำรองเท่าไรจึงเพียงพอและคุ้มค่าต่อระบบทั้งหมด อาจคาดการณ์จากข้อมูลทางสถิติ เช่น ความถี่ในการเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินต่อระบบ เป็นต้น แล้วถ้าเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินขึ้น กำลังไฟฟ้าสำรองสามารถชดเชยต่อกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปทันเวลาและเพียงพอหรือไม่

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

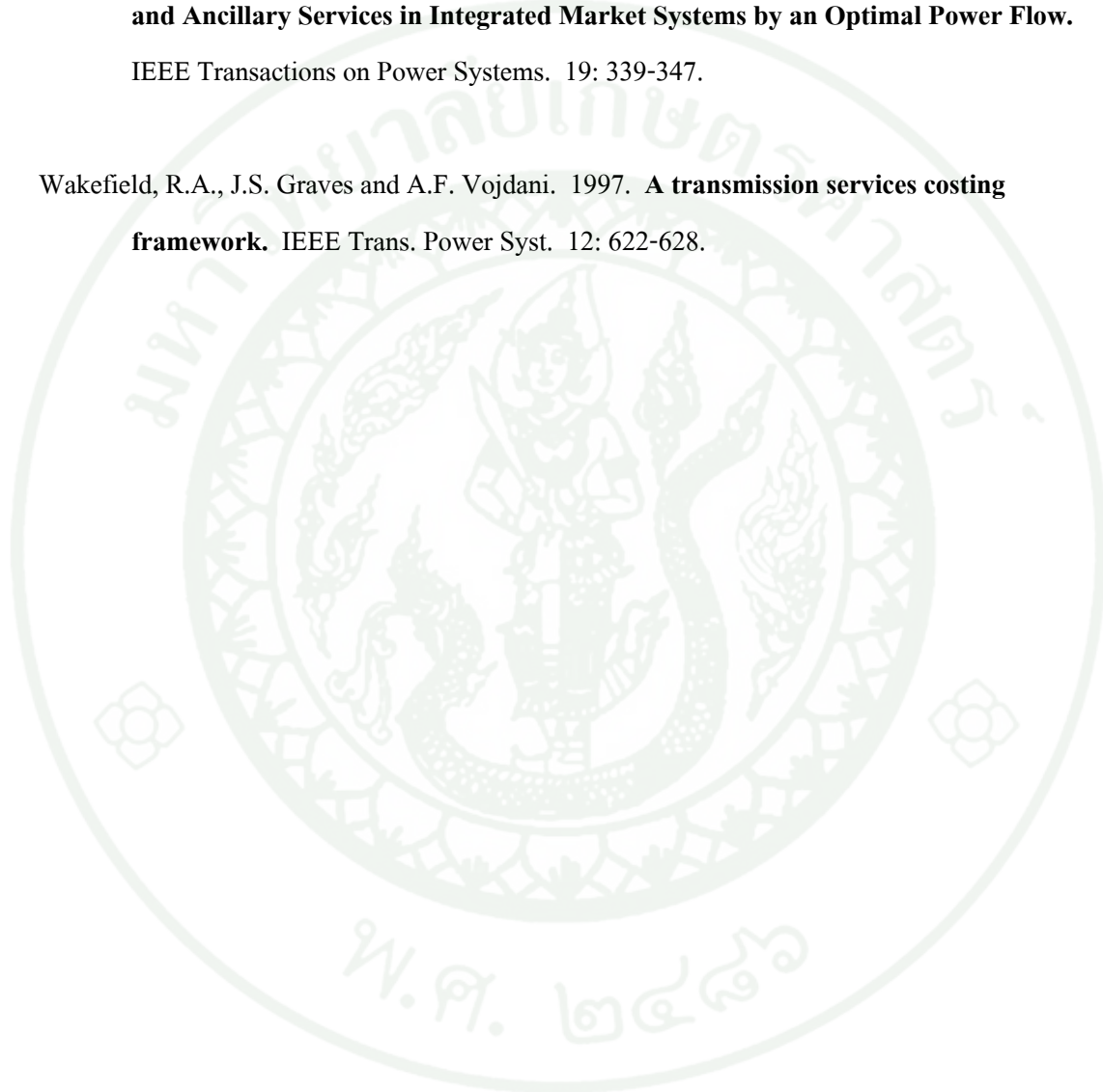
- จตุรวิทย์ บุษรา. 2554. การจัดการสถานะเกินพิกัดของระบบสายส่งในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบผสมโดยใช้การเสนอราคาไม่ให้อัดสัญญา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณรงค์ศักดิ์ เรืองโณม. 2551. การทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายสายส่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เอกสกล เทพสุภรณ์กุล. 2547. การศึกษาการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกลางในตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Cuervo, P. and F. Stacke. 2008. **A Combined Pool/Bilateral/Reserve Electricity Market Operating Under Pay-as-Bid Pricing.** IEEE Transactions on Power Systems. 23: 1601-1610
- Department of Market Monitoring. 2007. **Ancillary Services Markets.** Available Source: <http://www.nyiso.com>, May 12, 2011
- Galina, F.D., I. Kockar and P.C. Franco. 2002. **Combined pool/bilateral dispatch – path I: performance of trading strategies.** IEEE Transactions on Power Systems. 17: 92-99.
- Galina, F.D. and I. Kockar. 2002. **Combined pool/bilateral dispatch – path II: curtailment of firm and nonfirm contract.** IEEE Transactions on Power Systems. 17: 1184-1190.
- Gomez, T., C. Marnay, A. Siddiqui, L. Liew and M. Khavkin. 1999. **Ancillary Services Markets in California.** Available Source: <http://www.caiso.com>, March 17, 2012

New York Independent System Operator. 2011. Ancillary Services Manual.

Available Source: <http://www.nyiso.com>, December 17, 2012

Papalexopoulos, A.D., T. Wu, M. Rothleder and Z. Alaywan. 2004. **Pricing Energy and Ancillary Services in Integrated Market Systems by an Optimal Power Flow.** IEEE Transactions on Power Systems. 19: 339-347.

Wakefield, R.A., J.S. Graves and A.F. Vojdani. 1997. **A transmission services costing framework.** IEEE Trans. Power Syst. 12: 622-628.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ข้อมูลระบบจำลอง IEEE 30 บัส

### ข้อมูลระบบจำลอง IEEE 30 บัส

กำหนดค่ากำลังงานฐาน (System MVA Base) มีค่าเท่ากับ 100 MVA

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

บัส	$P_{G_i}^{\min}$	$P_{G_i}$	$P_{G_i}^{\max}$	$Q_{G_i}^{\min}$	$Q_{G_i}$	$Q_{G_i}^{\max}$	$V_i$	สถานะ	กำลังงานฐาน (MVA)
		(MW)			(MVAR)		(V)		
1	-	23.54	80	-20	-	150.0	1	1	100
2	-	60.97	80	-20	-	60.0	1	1	100
13	-	37.00	40	-15	-	44.7	1	1	100
22	-	21.59	50	-15	-	62.5	1	1	100
23	-	19.20	30	-10	-	40.0	1	1	100
27	-	26.91	55	-15	-	48.7	1	1	100

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

บัส	ค่าใช้จ่ายในการ		ราคาเสนอขายกำลังไฟฟ้าจริง		
	เดินเครื่อง เงินเครื่อง	ดับเครื่อง	a (\$/MW <sup>2</sup> h)	b (\$/MWh)	c (\$/h)
1	-	-	0.02	2	-
2	-	-	0.0175	0.175	-
13	-	-	0.025	3	-
22	-	-	0.0625	1	-
23	-	-	0.025	3	-
27	-	-	0.00834	3.25	-

ตารางผนวกที่ ก3 ข้อมูลพิกัดสูงสุดและค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

บัส	กำลังไฟฟ้าสำรอง							
	พิกัดสูงสุด (MW)				ราคาเสนอขาย (\$/MWh)			
	$SP_{G_i}^{\max}$	$NS_{G_i}^{\max}$	$RU_{G_i}^{\max}$	$RD_{G_i}^{\max}$	$C_i^{SP}$	$C_i^{NS}$	$C_i^{RU}$	$C_i^{RD}$
1	15	20	3	3	2	1	3	3
2	15	20	6	6	3	1.5	5	4
13	10	10	2	2	6	3.5	8	6
22	10	10	2	2	3.5	3	4	7
23	5	5	3	3	5	2.5	6.5	5.5
27	5	10	2	2	4	2	6	5

ตารางผนวกที่ ก4 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

บัส	ชนิด	$P_{D_i}$	$Q_{D_i}$	$G_s$	$B_s$	พื้นที่	$V_i$	$\delta_i$	BaseKV	โชน	$V_i^{\max}$	$V_i^{\min}$
1	3	-	-	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
2	2	21.7	12.7	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
3	1	2.4	1.2	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
5	1	-	-	-	0.19	1	1	-	135	1	1.05	0.95
6	1	-	-	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
8	1	30	30	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
9	1	-	-	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
10	1	5.8	2	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
11	1	-	-	-	-	1	1	-	135	1	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
13	2	-	-	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
14	1	6.2	1.6	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

บัส	ชนิด	$P_{D_i}$	$Q_{D_i}$	$G_s$	$B_s$	พื้นที่	$V_i$	$\delta_i$	BaseKV	โชน	$V_i^{\max}$	$V_i^{\min}$
15	1	8.2	2.5	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
17	1	9	5.8	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
18	1	3.2	0.9	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
21	1	17.5	11.2	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
22	2	-	-	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
23	2	3.2	1.6	-	-	2	1	-	135	1	1.05	0.95
24	1	8.7	6.7	-	0.04	3	1	-	135	1	1.05	0.95
25	1	0	0	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
26	1	3.5	2.3	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
27	2	-	-	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
28	1	-	-	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
29	1	2.4	0.9	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95
30	1	10.6	1.9	-	-	3	1	-	135	1	1.05	0.95

ตารางผนวกที่ ก5 ข้อมูลสายส่งในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

เส้น ที่	บัส ส่ง	บัส รับ	$r$	$x$	$b$	Rate A	Rate B	Rate C	Ratio	Angle	Status
1	1	2	0.02	0.06	0.03	130	130	130	-	-	1
2	1	3	0.05	0.19	0.02	130	130	130	-	-	1
3	2	4	0.06	0.17	0.02	65	65	65	-	-	1
4	3	4	0.01	0.04	0	130	130	130	-	-	1
5	2	5	0.05	0.2	0.02	130	130	130	-	-	1

## ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

เส้น ที่	บัส ส่ง	บัส รับ	$r$	$x$	$b$	Rate $A$	Rate $B$	Rate $C$	Ratio	Angle	Status
6	2	6	0.06	0.18	0.02	65	65	65	-	-	1
7	4	6	0.01	0.04	-	90	90	90	-	-	1
8	5	7	0.05	0.12	0.01	70	70	70	-	-	1
9	6	7	0.03	0.08	0.01	130	130	130	-	-	1
10	6	8	0.01	0.04	-	32	32	32	-	-	1
11	6	9	-	0.21	-	65	65	65	-	-	1
12	6	10	-	0.56	-	32	32	32	-	-	1
13	9	11	-	0.21	-	65	65	65	-	-	1
14	9	10	-	0.11	-	65	65	65	-	-	1
15	4	12	-	0.26	-	65	65	65	-	-	1
16	12	13	-	0.14	-	65	65	65	-	-	1
17	12	14	0.12	0.26	-	32	32	32	-	-	1
18	12	15	0.07	0.13	-	32	32	32	-	-	1
19	12	16	0.09	0.2	-	32	32	32	-	-	1
20	14	15	0.22	0.2	-	16	16	16	-	-	1
21	16	17	0.08	0.19	-	16	16	16	-	-	1
22	15	18	0.11	0.22	-	16	16	16	-	-	1
23	18	19	0.06	0.13	-	16	16	16	-	-	1
24	19	20	0.03	0.07	-	32	32	32	-	-	1
25	10	20	0.09	0.21	-	32	32	32	-	-	1
26	10	17	0.03	0.08	-	32	32	32	-	-	1
27	10	21	0.03	0.07	-	32	32	32	-	-	1
28	10	22	0.07	0.15	-	32	32	32	-	-	1
29	21	22	0.01	0.02	-	32	32	32	-	-	1

## ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

เส้น ที่	บัส ส่ง	บัส รับ	$r$	$x$	$b$	Rate $A$	Rate $B$	Rate $C$	Ratio	Angle	Status
30	15	23	0.1	0.2	-	16	16	16	-	-	1
31	22	24	0.12	0.18	-	16	16	16	-	-	1
32	23	24	0.13	0.27	-	16	16	16	-	-	1
33	24	25	0.19	0.33	-	16	16	16	-	-	1
34	25	26	0.25	0.38	-	16	16	16	-	-	1
35	25	27	0.11	0.21	-	16	16	16	-	-	1
36	28	27	-	0.42	-	65	65	65	-	-	1
37	27	29	0.22	0.42	-	16	16	16	-	-	1
38	27	30	0.32	0.6	-	16	16	16	-	-	1
39	29	30	0.24	0.45	-	16	16	16	-	-	1
40	8	28	0.06	0.2	0.02	32	32	32	-	-	1
41	6	28	0.02	0.06	0.01	32	32	32	-	-	1



ตารางผนวกที่ ข1 ผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 1

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		โหลด		ราคาต่อบัส	
	$V_i$	$\delta_i$	$P_{G_i}$	$Q_{G_i}$	$P_{D_i}$	$Q_{D_i}$	$C_i$	
	(pu)	(deg)	(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(\$/MWh)	
1	0.9671	0.00	40.37	-6.29	-	-	3.615	-0.000
2	0.9634	-0.77	54.05	-12.23	21.70	12.70	3.642	0.000
3	0.9641	-2.41	-	-	2.40	1.20	3.707	-0.020
4	0.9642	-2.86	-	-	7.60	1.60	3.723	-0.025
5	0.9774	-2.87	-	-	-	-	3.695	-0.049
6	0.9615	-3.24	-	-	-	-	3.726	-0.026
7	0.9582	-3.65	-	-	22.80	10.90	3.748	-0.019
8	0.9500	-3.69	-	-	30.00	30.00	6.543	2.583
9	0.9787	-4.15	-	-	-	-	3.802	0.026
10	0.9878	-4.62	-	-	5.80	2.00	3.842	0.051
11	0.9787	-4.15	-	-	-	-	3.802	0.026
12	1.0040	-4.52	-	-	11.20	7.50	3.795	0.006
13	1.0500	-3.31	15.89	34.69	-	-	3.795	-0.000
14	0.9932	-5.06	-	-	6.20	1.60	3.860	0.025
15	0.9961	-4.82	-	-	8.20	2.50	3.853	0.022
16	0.9899	-4.87	-	-	3.50	1.80	3.839	0.040
17	0.9831	-4.91	-	-	9.00	5.80	3.857	0.059
18	0.9804	-5.51	-	-	3.20	0.90	3.910	0.055
19	0.9746	-5.73	-	-	9.50	3.40	3.925	0.067
20	0.9770	-5.51	-	-	2.20	0.70	3.908	0.065
21	0.9973	-4.62	-	-	17.50	11.20	3.867	0.034
22	1.0041	-4.50	22.73	33.11	-	-	3.842	0.000
23	1.0132	-3.69	16.62	6.04	3.20	1.60	3.831	0.000
24	1.0068	-3.88	-	-	8.70	6.70	3.936	0.015
25	1.0282	-1.70	-	-	-	-	4.114	0.036

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		โหลด		ราคาที่บัส	
	$V_i$	$\delta_i$	$P_{G_i}$	$Q_{G_i}$	$P_{D_i}$	$Q_{D_i}$	$C_i$	
	(pu)	(deg)	(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(\$/MWh)	
26	1.0109	-2.11	-	-	3.50	2.30	4.186	0.084
27	1.0500	-0.11	42.51	27.38	-	-	3.959	-0.000
28	0.9705	-3.15	-	-	-	-	4.303	0.490
29	1.0307	-1.29	-	-	2.40	0.90	4.061	0.028
30	1.0196	-2.11	-	-	10.60	1.90	4.132	0.040
รวม	-	-	192.17	82.70	189.20	107.20	-	-

ตารางผนวกที่ ข2 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 1

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$	$Q_{loss}$
			$P_i$	$Q_i$	$P_i$	$Q_i$		
			(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)
1	1	2	20.60	-0.71	-20.51	0.98	0.09	0.27
2	1	3	19.77	-3.24	-19.55	4.06	0.21	0.81
3	2	4	17.68	-6.32	-17.45	6.97	0.23	0.65
4	3	4	17.15	-4.33	-17.12	4.46	0.03	0.13
5	2	5	14.74	-10.11	-14.57	10.80	0.17	0.69
6	2	6	20.44	-5.31	-20.15	6.17	0.29	0.86
7	4	6	16.20	2.50	-16.17	-2.39	0.03	0.12
8	5	7	14.57	9.63	-14.41	-9.25	0.16	0.38
9	6	7	8.41	0.80	-8.39	-0.74	0.02	0.06
10	6	8	23.40	21.82	-23.29	-21.38	0.11	0.44
11	6	9	7.12	-7.82	-7.12	8.08	0.00	0.25
12	6	10	4.07	-4.47	-4.07	4.69	0.00	0.22

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVAR)
			$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)	$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)		
13	9	11	0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00
14	9	10	7.12	-8.08	-7.12	8.21	0.00	0.13
15	4	12	10.77	-14.60	-10.77	15.52	0.00	0.92
16	12	13	-15.89	-32.84	15.89	34.69	0.00	1.85
17	12	14	4.59	2.05	-4.56	-1.99	0.03	0.07
18	12	15	5.71	3.02	-5.68	-2.97	0.03	0.05
19	12	16	5.17	4.75	-5.12	-4.65	0.04	0.10
20	14	15	-1.64	0.39	1.65	-0.38	0.01	0.01
21	16	17	1.62	2.85	-1.61	-2.83	0.01	0.02
22	15	18	7.16	3.58	-7.09	-3.43	0.07	0.14
23	18	19	3.89	2.53	-3.88	-2.51	0.01	0.03
24	19	20	-5.62	-0.89	5.63	0.92	0.01	0.02
25	10	20	7.89	1.76	-7.83	-1.62	0.06	0.14
26	10	17	7.41	3.02	-7.39	-2.97	0.02	0.05
27	10	21	-4.70	-11.40	4.74	11.50	0.05	0.11
28	10	22	-5.22	-8.29	5.29	8.44	0.07	0.15
29	21	22	-22.24	-22.70	22.34	22.91	0.10	0.20
30	15	23	-11.33	-2.73	11.47	3.01	0.14	0.27
31	22	24	-4.90	1.77	4.93	-1.72	0.03	0.05
32	23	24	1.95	1.44	-1.94	-1.42	0.01	0.02
33	24	25	-11.69	0.44	11.94	0.00	0.26	0.45
34	25	26	3.54	2.37	-3.50	-2.30	0.04	0.07
35	25	27	-15.49	-2.37	15.74	2.86	0.26	0.49
36	28	27	-13.50	-18.92	13.50	21.22	0.00	2.29

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVAR)
			$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)	$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)		
37	27	29	6.16	1.66	-6.08	-1.50	0.08	0.16
38	27	30	7.11	1.64	-6.95	-1.35	0.15	0.29
39	29	30	3.68	0.60	-3.65	-0.55	0.03	0.06
40	8	28	-6.71	-7.72	6.78	7.95	0.07	0.23
41	6	28	-6.68	-12.26	6.72	12.39	0.04	0.13
รวม	-	-	-	-	-	-	2.970	13.39

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 2

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		โหลด		ราคาที่บัส	
	$V_i$	$\delta_i$	$P_{G_i}$	$Q_{G_i}$	$P_{D_i}$	$Q_{D_i}$	$C_i$	
	(pu)	(deg)	(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(\$/MWh)	
1	0.9794	0.00	42.00	-4.14	-	-	3.805	-0.000
2	0.9750	-0.85	45.38	-6.31	21.70	12.70	3.838	-0.000
3	0.9733	-2.16	-	-	2.40	1.20	3.893	-0.011
4	0.9726	-2.56	-	-	7.60	1.60	3.909	-0.015
5	0.9869	-2.74	-	-	-	-	3.891	-0.045
6	0.9694	-2.92	-	-	-	-	3.918	-0.013
7	0.9669	-3.39	-	-	22.80	10.90	3.943	-0.009
8	0.9579	-3.35	-	-	30.00	30.00	5.130	1.137
9	0.9808	-3.62	-	-	-	-	3.959	0.019
10	0.9869	-3.98	-	-	5.80	2.00	3.980	0.035
11	0.9808	-3.62	-	-	-	-	3.959	0.019
12	1.0030	-3.75	-	-	11.20	7.50	3.941	-0.000

## ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		โหลด		ราคาต่อบัส	
	$V_i$ (pu)	$\delta_i$ (deg)	$P_{G_i}$ (MW)	$Q_{G_i}$ (MVAR)	$P_{D_i}$ (MW)	$Q_{D_i}$ (MVAR)	$C_i$ (\$/MWh)	
13	1.0442	-2.31	18.82	30.93	-	-	3.941	0.000
14	0.9922	-4.27	-	-	6.20	1.60	3.999	0.019
15	0.9951	-4.01	-	-	8.20	2.50	3.981	0.019
16	0.9889	-4.15	-	-	3.50	1.80	3.983	0.030
17	0.9822	-4.26	-	-	9.00	5.80	3.998	0.045
18	0.9793	-4.77	-	-	3.20	0.90	4.043	0.047
19	0.9736	-5.02	-	-	9.50	3.40	4.061	0.058
20	0.9760	-4.82	-	-	2.20	0.70	4.045	0.054
21	0.9949	-3.90	-	-	17.50	11.20	3.982	0.016
22	1.0013	-3.75	23.75	28.82	-	-	3.968	0.000
23	1.0122	-2.75	18.34	5.43	3.20	1.60	3.917	-0.000
24	1.0052	-3.08	-	-	8.70	6.70	3.988	0.013
25	1.0276	-0.98	-	-	-	-	3.996	0.015
26	1.0102	-1.40	-	-	3.50	2.30	4.066	0.061
27	1.0500	0.56	43.67	25.96	-	-	3.978	-0.000
28	0.9778	-2.77	-	-	-	-	4.152	0.205
29	1.0307	-0.62	-	-	2.40	0.90	4.081	0.029
30	1.0196	-1.44	-	-	10.60	1.90	4.152	0.040
รวม	-	-	191.95	80.69	189.20	107.20	-	-

ตารางผนวกที่ ๗4 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 2

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVAR)
			$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)	$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)		
1	1	2	23.46	-0.38	-23.34	0.72	0.11	0.34
2	1	3	18.54	-1.36	-18.36	2.05	0.18	0.68
3	2	4	15.31	-3.81	-15.15	4.25	0.16	0.44
4	3	4	15.96	-2.30	-15.94	2.41	0.03	0.11
5	2	5	13.66	-8.99	-13.51	9.55	0.14	0.56
6	2	6	18.06	-2.65	-17.85	3.29	0.21	0.63
7	4	6	15.71	3.98	-15.68	-3.87	0.03	0.11
8	5	7	13.51	10.91	-13.36	-10.54	0.15	0.37
9	6	7	9.47	-0.50	-9.44	0.57	0.03	0.08
10	6	8	23.12	22.13	-23.01	-21.69	0.11	0.44
11	6	9	5.56	-5.24	-5.56	5.37	-0.00	0.13
12	6	10	3.18	-3.00	-3.18	3.11	0.00	0.11
13	9	11	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00
14	9	10	5.56	-5.37	-5.56	5.44	0.00	0.07
15	4	12	7.78	-11.29	-7.78	11.81	0.00	0.52
16	12	13	-18.82	-29.25	18.82	30.93	0.00	1.68
17	12	14	4.49	2.12	-4.47	-2.06	0.03	0.06
18	12	15	5.32	3.24	-5.29	-3.19	0.03	0.05
19	12	16	5.58	4.57	-5.54	-4.47	0.05	0.10
20	14	15	-1.73	0.46	1.74	-0.45	0.01	0.01
21	16	17	2.04	2.67	-2.03	-2.64	0.01	0.02
22	15	18	7.55	3.40	-7.47	-3.25	0.08	0.15
23	18	19	4.27	2.35	-4.26	-2.32	0.01	0.03
24	19	20	-5.24	-1.08	5.25	1.10	0.01	0.02

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVAR)
			$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)	$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)		
25	10	20	7.51	1.93	-7.45	-1.80	0.06	0.13
26	10	17	6.99	3.20	-6.97	-3.16	0.02	0.05
27	10	21	-5.74	-8.9	5.78	8.98	0.03	0.08
28	10	22	-5.82	-6.79	5.88	6.91	0.06	0.12
29	21	22	-23.28	-20.18	23.37	20.37	0.10	0.19
30	15	23	-12.20	-2.26	12.36	2.57	0.16	0.31
31	22	24	-5.50	1.53	5.54	-1.47	0.04	0.06
32	23	24	2.78	1.26	-2.77	-1.24	0.01	0.02
33	24	25	-11.47	0.01	11.72	0.42	0.25	0.43
34	25	26	3.54	2.37	-3.50	-2.30	0.04	0.07
35	25	27	-15.26	-2.79	15.52	3.27	0.25	0.48
36	28	27	-14.88	-17.23	14.88	19.40	0.00	2.17
37	27	29	6.16	1.66	-6.08	-1.50	0.08	0.16
38	27	30	7.11	1.64	-6.95	-1.35	0.15	0.29
39	29	30	3.68	0.60	-3.65	-0.55	0.03	0.06
40	8	28	-6.99	-7.39	7.06	7.62	0.07	0.23
41	6	28	-7.79	-10.93	7.82	11.04	0.04	0.11
รวม	-	-	-	-	-	-	2.753	11.69

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดในระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 3

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		โหลด		ราคาต่อบัส	
	$V_i$ (pu)	$\delta_i$ (deg)	$P_{G_i}$ (MW)	$Q_{G_i}$ (MVAR)	$P_{D_i}$ (MW)	$Q_{D_i}$ (MVAR)	$C_i$ (\$/MWh)	
1	0.9676	0.00	48.84	-5.82	-	-	3.794	-0.000
2	0.9627	-0.97	41.00	-11.11	21.70	12.70	3.830	0.000
3	0.9645	-2.28	-	-	2.40	1.20	3.887	-0.019
4	0.9645	-2.70	-	-	7.60	1.60	3.904	-0.024
5	0.9769	-2.90	-	-	-	-	3.879	-0.050
6	0.9615	-3.09	-	-	-	-	3.900	-0.024
7	0.9581	-3.57	-	-	22.80	10.90	3.928	-0.017
8	0.9500	-3.54	-	-	30.00	30.00	11.689	7.209
9	0.9761	-3.67	-	-	-	-	4.037	0.052
10	0.9838	-3.97	-	-	5.80	2.00	4.108	0.090
11	0.9761	-3.67	-	-	-	-	4.037	0.052
12	1.0033	-3.68	-	-	11.20	7.50	4.024	0.016
13	1.0500	-2.13	20.47	35.28	-	-	4.023	0.000
14	0.9925	-4.20	-	-	6.20	1.60	4.101	0.038
15	0.9954	-3.94	-	-	8.20	2.50	4.100	0.033
16	0.9878	-4.11	-	-	3.50	1.80	4.086	0.063
17	0.9796	-4.24	-	-	9.00	5.80	4.119	0.094
18	0.9784	-4.72	-	-	3.20	0.90	4.169	0.077
19	0.9720	-4.98	-	-	9.50	3.40	4.190	0.096
20	0.9740	-4.78	-	-	2.20	0.70	4.174	0.096
21	0.9927	-3.89	-	-	17.50	11.20	4.175	0.099
22	0.9993	-3.73	24.63	29.35	-	-	4.079	-0.000
23	1.0134	-2.63	20.00	5.80	3.20	1.60	4.097	-0.000
24	1.0048	-3.13	-	-	8.70	6.70	4.273	0.002
25	1.0275	-1.32	-	-	-	-	4.705	-0.003

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

บัส	แรงดันไฟฟ้า		กำลังการผลิต		โหลด		ราคาที่บัส	
	$V_i$	$\delta_i$	$P_{G_i}$	$Q_{G_i}$	$P_{D_i}$	$Q_{D_i}$	$C_i$	
	(pu)	(deg)	(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(\$/MWh)	
26	1.0101	-1.74	-	-	3.50	2.30	4.787	0.052
27	1.0500	0.04	41.05	28.46	-	-	4.935	0.000
28	0.9705	-2.99	-	-	-	-	5.562	1.423
29	1.0307	-1.13	-	-	2.40	0.90	5.062	0.035
30	1.0196	-1.96	-	-	10.60	1.90	5.150	0.050
รวม	-	-	191.99	81.96	189.20	107.20	-	-

ตารางผนวกที่ ข6 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัสกรณีศึกษาที่ 3

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$	$Q_{loss}$
			$P_i$	$Q_i$	$P_i$	$Q_i$		
(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)			
1	1	2	26.08	-0.52	-25.93	0.95	0.15	0.44
2	1	3	18.76	-2.96	-18.57	3.69	0.19	0.73
3	2	4	14.45	-5.87	-14.29	6.32	0.16	0.45
4	3	4	16.17	-3.96	-16.14	4.08	0.03	0.12
5	2	5	13.36	-9.92	-13.21	10.52	0.15	0.60
6	2	6	17.42	-4.80	-17.21	5.43	0.21	0.63
7	4	6	16.45	3.27	-16.42	-3.15	0.03	0.12
8	5	7	13.21	9.92	-13.07	-9.57	0.14	0.34
9	6	7	9.77	0.49	-9.73	-0.41	0.03	0.08
10	6	8	23.40	21.82	-23.29	-21.38	0.11	0.44
11	6	9	4.55	-6.67	-4.55	6.82	-0.00	0.15
12	6	10	2.60	-3.81	-2.60	3.94	-0.00	0.13

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVAR)
			$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)	$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)		
13	9	11	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	9	10	4.55	-6.82	-4.55	6.90	0.00	0.08
15	4	12	6.38	-14.34	-6.38	15.03	0.00	0.69
16	12	13	-20.47	-33.16	20.47	35.28	0.00	2.11
17	12	14	4.46	2.15	-4.44	-2.09	0.03	0.06
18	12	15	5.18	3.35	-5.15	-3.30	0.03	0.05
19	12	16	6.00	5.12	-5.95	-5.00	0.06	0.12
20	14	15	-1.76	0.49	1.77	-0.48	0.01	0.01
21	16	17	2.45	3.20	-2.43	-3.17	0.01	0.03
22	15	18	7.90	3.78	-7.82	-3.61	0.09	0.17
23	18	19	4.62	2.71	-4.60	-2.67	0.02	0.04
24	19	20	-4.90	-0.73	4.91	0.75	0.01	0.02
25	10	20	7.16	1.56	-7.11	-1.45	0.05	0.12
26	10	17	6.58	2.67	-6.57	-2.63	0.02	0.04
27	10	21	-6.26	-9.77	6.30	9.87	0.04	0.10
28	10	22	-6.13	-7.30	6.20	7.44	0.07	0.14
29	21	22	-23.80	-21.07	23.90	21.27	0.10	0.21
30	15	23	-12.72	-2.49	12.89	2.83	0.17	0.34
31	22	24	-5.47	0.63	5.51	-0.57	0.04	0.05
32	23	24	3.91	1.37	-3.89	-1.33	0.02	0.05
33	24	25	-10.32	-0.80	10.52	1.15	0.20	0.35
34	25	26	3.54	2.37	-3.50	-2.30	0.04	0.07
35	25	27	-14.07	-3.51	14.29	3.93	0.22	0.42
36	28	27	-13.50	-18.92	13.50	21.22	0.00	2.29

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

สายส่ง เส้นที่	บัส ส่ง	บัส รับ	กำลังไฟฟ้าไหลเข้า				กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	
			บัสส่ง		บัสรับ		$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVAR)
			$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)	$P_i$ (MW)	$Q_i$ (MVAR)		
37	27	29	6.16	1.66	-6.08	-1.50	0.08	0.16
38	27	30	7.11	1.64	-6.95	-1.35	0.15	0.29
39	29	30	3.68	0.60	-3.65	-0.55	0.03	0.06
40	8	28	-6.71	-7.72	6.78	7.95	0.07	0.23
41	6	28	-6.68	-12.26	6.72	12.39	0.04	0.13
รวม	-	-	-	-	-	-	2.790	12.64

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายชาญณรงค์ สุขสมานพาณิชย์
เกิดวันที่	19 กุมภาพันธ์ 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-