

การจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าคำนึงถึงสถานะเกินพิกัดในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบผสมที่มีการซื้อขายผ่านตลาดกลางร่วมกับสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี/พหุภาคี โดยใช้วิธีเสนอราคาปรับลดแบบกลุ่ม

Power Generation Allocation Considering System Congestion in Mixed Electricity Markets with Pool and Bilateral/Multilateral Contracts using Group Curtailment Bids

ศราวุธ ภาสพานทอง และ ปานจิต ดำรงกุลกำจร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Email : sarawut_p78@hotmail.com, fengpj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาคำตอบของปัญหาสถานะเกินพิกัดที่เกิดขึ้นในระบบซื้อขายไฟฟ้าแบบเสรีของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ในตลาดการซื้อขายไฟฟ้าซึ่งการศึกษาการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ สัญญาการซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงและสัญญาซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบไม่มั่นคง โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดมาช่วยในการคำนวณ ซึ่งหากระบบไม่สามารถรองรับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าหรือระบบเกิดสถานะเกินพิกัด อันเนื่องมาจากเกิดการติดขัดของสายส่ง จนไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ตามสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ดังนั้นศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระจะต้องใช้วิธีเสนอราคาปรับลดแบบกลุ่ม สำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคี เพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดสถานะเกินพิกัดของระบบ ซึ่งผู้ซื้อขายไฟฟ้าพหุภาคีต้องเสนอราคาที่สูงเพื่อแข่งขันกับผู้ซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคง เพื่อไม่ให้ถูกปรับลดสัญญาซื้อขายไฟฟ้า และถ้าผู้ซื้อขายไฟฟ้าพหุภาคีถูกปรับลดสัญญา ซึ่งส่งผลให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าลดลงจากสัญญาที่ได้ตกลงไว้ ผู้ซื้อขายไฟฟ้าพหุภาคีจำเป็นต้องซื้อขายไฟฟ้าในตลาดซื้อขายไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับปริมาณกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการ โดยที่ไหลรวม ณ บัสใดๆ จะมีค่าคงที่และไม่มีการตัดไหล

คำสำคัญ

สถานะเกินพิกัดของสายส่ง ตลาดซื้อขายไฟฟ้า การทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ราคาปรับลดแบบกลุ่ม การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด

Abstract

This paper proposes the study of congestion management in energy transactions with bilateral and multilateral contracts in electricity market. The bilateral transactions include the firm bilateral and nonfirm bilateral contracts. The study applies the concept of optimal power flow in order to optimally dispatch power generations. When there are transmission congestions in the system resulting in the shortage of power generation in bilateral or multilateral contracts, the

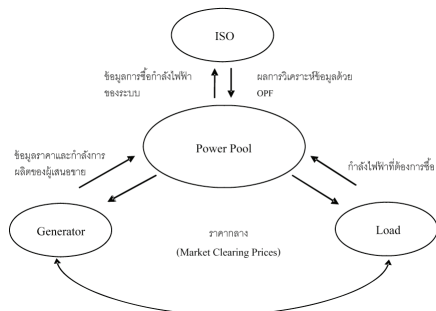
independent system operator (ISO) uses the non-curtailment bids for bilateral contracts and group curtailment bids for multilateral contracts to curtail the contract. The participants in multilateral contracts must offer higher bids than the participants in the firm bilateral contracts in order to receive the full amount of power generation on the contract. If the contract is curtailed, the shortage power generation is compensated by the purchase from the pool. Therefore the demand at each and every bus in the system is satisfied without being shed.

Keywords

transmission congestion, electricity markets, bilateral/multilateral contracts, group curtailment bids, optimal power flow

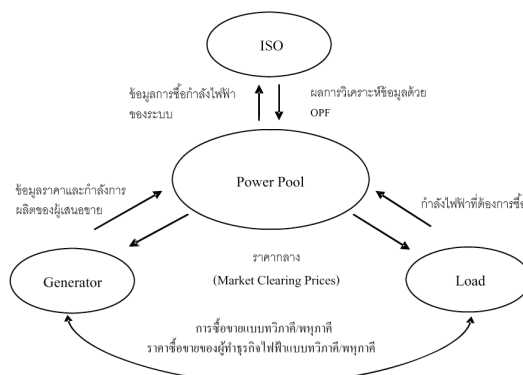
1. คำนำ

การซื้อขายกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง (Pool Markets) ผู้ผลิตจะเสนอราคาขายและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ให้แก่ตลาดกลาง โดยผู้ซื้อต้องส่งข้อมูลปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้กับตลาดกลางด้วย ข้อมูลจากทั้งสองส่วนจะถูกส่งให้กับศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระ (Independent System Operator : ISO) เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด หากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จะซื้อขายทำให้ระบบขาดเสถียรภาพทางไฟฟ้า อาจจำเป็นต้องปรับปริมาณกำลังไฟฟ้าในส่วนของผู้ผลิตหรือส่วนของผู้ซื้อ หรือทั้งสองส่วนตามแต่จะตกลง กรณีไม่มีผลกระทบต่อระบบเกินค่าที่จะยอมรับได้ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระจะส่งข้อมูลจากการวิเคราะห์ให้กับตลาดกลาง เพื่อใช้ประกาศราคาตลาดกลาง (Market Clearing Prices)



ภาพที่ 1 การซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรีผ่านตลาดกลาง

การเปิดตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรี เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเลือกซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ เรียกว่าการซื้อขายไฟฟ้าแบบไม่ผ่านตลาดกลาง โดยการซื้อขายดังกล่าวจะกระทำภายใต้ข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ซื้อไฟฟ้า โดยการซื้อขายไฟฟ้าแบบไม่ผ่านตลาดกลาง เรียกว่า การทำธุรกรรมไฟฟ้าแบบทวิภาคี (Bilateral contracts) [1, 2] ซึ่งการซื้อขายไฟฟ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทำธุรกรรมไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี [3-7] อย่างไรก็ตามการทำธุรกรรมซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ต้องมีการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง ซึ่งจะมีการใช้สายส่งร่วมกับการซื้อขายไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง และอาจก่อให้เกิดสภาวะเกินพิกัดของระบบสายส่งเกิดขึ้นได้ [1,3]



ภาพที่ 2 การซื้อขายกำลังไฟฟ้าเสรีผ่านตลาดกลาง และแบบทวิภาคี/พหุภาคี

การทำธุรกิจซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี จะกระทำภายใต้สัญญาการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี 2 แบบ คือ สัญญาซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคง (firm bilateral contract) และสัญญาซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบไม่มั่นคง (nonfirm bilateral contract) [1,8] โดยศึกษาเกี่ยวกับการทำธุรกิจซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคี โดยผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถดำเนินการซื้อกำลังไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายใดก็ได้ นอกจากนี้ผู้ผลิตและผู้ซื้อกำลังไฟฟ้ายังสามารถซื้อขายและส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างกลุ่มภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด (Optimal Power Flow: OPF) [3,9 -10] ถ้าหากระบบไม่สามารถรองรับหรือระบบเกิดสถานะเกินพิกัด (Congestion) อันเนื่องมาจากเกิดการติดขัดของสายส่งจนไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ตามสัญญาที่ซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ผู้ดูแลระบบจะต้องใช้วิธีเสนอปรับลดแบบกลุ่ม [9] มาปรับลดกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี เพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดสถานะเกินพิกัดของระบบ [4,10-11] โดยปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีที่ถูกปรับลดกำลังไฟฟ้าจะถูกปรับเปลี่ยนให้ไปซื้อกำลังไฟฟ้าจากตลาดกลางแทน โดยที่โดยรวม ณ บัสใดๆ จะมีค่าคงที่และไม่มีการตัดไหล

2. วิธีการ

บทความนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB มาทดสอบการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี โดยใช้หลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด (OPF) มาช่วยในการคำนวณวิเคราะห์ โดยรูปแบบทั่วไปของสมการหลักการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดจะมีการปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายให้มีฟังก์ชันของระบบการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี /พหุภาคีที่มีการเสนอราคาเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญา สำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคงและสำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคงมีสมการเงื่อนไขของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีเพิ่มเข้ามาจากเงื่อนไขของสมการ OPF ปกติ

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ มีดังต่อไปนี้

a_i, b_i, c_i	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
B_i^D	คือ ค่าน้ำหนักของการซื้อกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง [\$/MWh]
$B_{G_{ij}}^{B_F}$	คือ ราคาเสนอเพื่อการปรับลดสัญญา (Curtailment bids) ของค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกส่งจากผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า (Generator) บัส i ไปยังผู้ซื้อกำลังไฟฟ้า (Load) บัส j ในสัญญาซื้อขาย ไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง (Firm bilateral contract) [\$/MWh]
$B_{G_{ij}}^{B_{NF}}$	คือ ราคาเสนอเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญา (Noncurtailment bids) ของค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกส่งจากผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าบัส i ไปยังผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัส j ในสัญญาซื้อขาย ไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง (Nonfirm bilateral contract) [\$/MWh]
I_{gen}	คือ เซตของบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
I_{bus}	คือ เซตของบัสในระบบ
I_{line}	คือ เซตของสายส่งในระบบ
I_F	คือ เซตของบัสที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง
I_{NF}	คือ เซตของบัสที่ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง
I_{load}	คือ เซตของบัสที่มีโหลด
P_{D_i}	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการของโหลดที่บัส i [MW]
$P_{D_{ij}}^{B_F}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้รับการจัดสรรจากการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง (Firm bilateral contract) ที่ส่งจากบัส i ของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าที่บัส j [MW]
$P_{D_{ij}}^{B_{NF}}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการจากการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง (Firm bilateral contract) ที่ส่งจากบัส i ของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าที่บัส j [MW]

$P_{D_{ij}}^{B_{NF}}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้รับการจัดสรรจาก การทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง (Nonfirm bilateral contract) ที่ส่งจากบัส i ของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ซื้อกำลังไฟฟ้า ที่บัส j [MW]	$P_{G_i}^P$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผู้ผลิตต้องผลิตเพื่อจ่าย ให้กับโหลดที่ซื้อขายผ่านกลางที่บัส i [MW]
$P_{D_{ij}}^{B_{NF}^{req}}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ที่ต้องการจากการ ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง (Nonfirm bilateral contract) ที่ส่งจาก บัส i ของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ซื้อกำลัง ไฟฟ้าที่บัส j [MW]	$P_i(V, \delta)$	คือ กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลออกจาก บัส i สู่บัส k ใดๆ ที่เชื่อมกับบัส i [MW]
$P_{D_{jk}}^M$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการสำหรับ ธุรกิจซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคี เพื่อส่ง ให้กับโหลดกลุ่ม k [MW]	$P_{ik}(\delta_i, \delta_j)$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งที่ เชื่อมระหว่างบัส i และบัส k [MW]
$P_{D_{jk}}^M$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการสำหรับการทำ ธุรกิจซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคีที่สมาชิก k ใดๆ ตกลงซื้อขายกับผู้ผลิต i [MW]	P_{l_i}	คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง l_i [MW]
$P_{D_{jk}}^{M_{req}}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตลาดกลางต้องการ ที่บัส i [MW]	$P_{l_i}^{max}$	คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง l_i [MW]
$P_{D_i}^P$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตลาดกลางต้องการ ที่บัส i [MW]	Q_{G_i}	คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่บัส i [MVA]
$P_{D_{ji}}^{B_{NF}}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการสำหรับการ ทำธุรกิจซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบไม่มั่นคงที่ บัส j ซื้อจากบัส i [MW]	$Q_{G_i}^{max}$	คือ กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนสูงสุด ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i [MVA]
$P_{G_{ik}}^M$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จัดสรรให้กับการทำธุรกิจ ซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคีซึ่งผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า ส่งกำลังไฟฟ้าจากบัส i ให้กับโหลดกลุ่ม k	$Q_{G_i}^{min}$	คือ กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนต่ำสุด ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i [MVA]
P_{G_i}	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผู้ผลิตต้องผลิตเพื่อจ่าย ให้กับโหลดที่บัส i [MW]	$S_{ij}(V, \delta)$	คือ กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ไหลผ่านสายส่งจากบัส i ไปยังบัส j [MVar]
$P_{G_i}^{max}$	คือ กำลังการผลิตสูงสุดของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่บัส i [MW]	$S_{ij, max}$	คือ พิกัดสูงสุดของสายส่งที่ไหลผ่านสายส่ง จากบัส i ไปยังบัส j [MVar]
$P_{G_i}^{min}$	คือ กำลังการผลิตต่ำสุดของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่บัส i [MW]	V_i	คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส i [V]
$P_{G_{ik}}^{M_{req}}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จัดสรรให้กับการทำ ธุรกิจซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคีตามความ ต้องการซึ่งผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าส่งกำลังไฟฟ้า จากบัส i ให้กับโหลดกลุ่ม k	V_i^{max}	คือ พิกัดสูงสุดของแรงดันที่บัส i [V]
		V_i^{min}	คือ พิกัดต่ำสุดของแรงดันที่บัส i [V]
		$W_{ij}^{B_F}$	คือ แฟกเตอร์เงินจ่ายเพิ่มพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยง การปรับลดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจาก บัส i ไปยังบัส j สำหรับการทำธุรกิจไฟฟ้า ทวิภาคีแบบมั่นคง
		$W_{ij}^{B_{NF}}$	คือ แฟกเตอร์เงินจ่ายเพิ่มพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยง การปรับลดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจาก บัส i ไปยังบัส j สำหรับการทำธุรกิจไฟฟ้า ทวิภาคีแบบไม่มั่นคง
		W_{ij}^M	คือ แฟกเตอร์เงินจ่ายเพิ่มพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยง การปรับลดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j สำหรับการทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคี
		δ_i	คือ มุมของแรงดันที่บัส i
		δ_k	คือ มุมของแรงดันที่บัส k

2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ทำให้ผลดีที่สุด (OPF) เมื่อระบบมีการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสมที่มีการซื้อขายผ่านตลาดกลางร่วมกับสัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี/พหุภาคีโดยใช้วิธีเสนอราคาปรับลดแบบกลุ่ม

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆ อาจจะมีผลผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อขายให้กับผู้ซื้อไฟฟ้าผ่านตลาดกลางและผู้ที่ซื้อกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ที่มีสัญญาการทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงและแบบไม่มั่นคง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัส i สามารถเขียนแทนด้วยตัวแปรต่อไปนี้

$$P_{G_i} = P_{G_i}^P + \sum_{l,j \in B_F} P_{D_{lj}}^{B_F} + \sum_{l,j \in B_{NF}} P_{D_{lj}}^{B_{NF}} + \sum_{k \in M} P_{G_{lk}}^M \quad (1)$$

ในทำนองเดียวกัน ความต้องการกำลังไฟฟ้าที่บัสใด ๆ มีทั้งความต้องการกำลังไฟฟ้าจากการซื้อกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง และจากการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ที่มีสัญญาการทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงและแบบไม่มั่นคง ดังนั้น ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัส i คือ

$$P_{D_i} = P_{D_i}^P + \sum_{j \in B_F} P_{D_{ij}}^{B_F} + \sum_{j \in B_{NF}} P_{D_{ij}}^{B_{NF}} + \sum_{k \in M} P_{D_{ik}}^M ; i \in I_{bus} \quad (2)$$

ดังนั้นจึงเขียนฟังก์ชันเป้าหมายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{i \in G} & \left[a_i + b_i \left(P_{G_i}^P + \sum_{l,j \in B_F} P_{D_{lj}}^{B_F} + \sum_{l,j \in B_{NF}} P_{D_{lj}}^{B_{NF}} \right. \right. \\ & + \left. \sum_{k \in M} P_{G_{lk}}^M \right) + c_i \left(P_{G_i}^P + \sum_{l,j \in B_F} P_{D_{lj}}^{B_F} + \sum_{l,j \in B_{NF}} P_{D_{lj}}^{B_{NF}} \right. \\ & + \left. \left. \sum_{k \in M} P_{G_{lk}}^M \right)^2 \right] + \sum_{i,j \in B_F} W_{ij}^{B_F} (P_{D_{ij}}^{B_F, req} - P_{D_{ij}}^{B_F}) + \\ & \sum_{i,j \in B_{NF}} W_{ij}^{B_{NF}} (P_{D_{ij}}^{B_{NF}, req} - P_{D_{ij}}^{B_{NF}}) + \sum_{k \in M} W_k^M (P_{D_{lk}}^{M, req} - P_{D_{lk}}^M) \quad (3) \end{aligned}$$

เงื่อนไขบังคับสมการ ได้แก่

ก. สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง

$$\begin{aligned} P_i(V, \delta) = & \left(P_{G_i}^P + \sum_{j \in B_F} P_{D_{ij}}^{B_F} + \sum_{j \in B_{NF}} P_{D_{ij}}^{B_{NF}} + \sum_{k \in M} P_{G_{lk}}^M \right) \\ & - \left(P_{D_i}^P + \sum_{j \in B_F} P_{D_{ij}}^{B_F} + \sum_{j \in B_{NF}} P_{D_{ij}}^{B_{NF}} + \sum_{k \in M} P_{D_{ik}}^M \right) \quad (4) \end{aligned}$$

ข. สมการความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงสมดุล ณ บัสที่ i ใช้ควบคุมความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงรวมของระบบที่บัส i ให้มีค่าตามที่ต้องการ

$$P_{D_i}^P + \sum_{j \in B_F} P_{D_{ij}}^{B_F} + \sum_{j \in B_{NF}} P_{D_{ij}}^{B_{NF}} + \sum_{k \in M} P_{D_{ik}}^M = P_{D_i} ; i \in I_{bus} \quad (5)$$

โดยที่โหลรวม ณ บัสใดๆ ต้องมีค่าเท่ากับ P_{D_i} และไม่มีการตัดโหล

ค. กำลังไฟฟ้าสมดุลของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคี

$$\sum_{i \in G} P_{G_{lk}}^M = \sum_{j \in D} P_{D_{lj}}^M ; k \in M \quad (6)$$

ง. สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน

$$Q_i(V, \delta) = Q_{G_i} - Q_{D_i} ; i \in I_{bus} \quad (7)$$

เงื่อนไขบังคับสมการ ได้แก่ขีดจำกัดของปริมาณทางไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า

ก. พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ไหลในสายส่ง

$$|S_{ij}(\delta, V)| \leq S_{ij, max} ; i \in I_{line} \quad (8)$$

ข. พิกัดสูงสุดและต่ำสุดของแรงดันที่บัส

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

ค. พิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} ; i \in I_{gen} \quad (10)$$

ง. พิกัดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{G_i}^{min} \leq P_{G_i}^P + \sum_{j \in B_F} P_{D_{ij}}^{B_F} + \sum_{j \in B_{NF}} P_{D_{ij}}^{B_{NF}} + \sum_{k \in M} P_{G_{lk}}^M \leq P_{G_i}^{max} \quad (11)$$

จ. ขอบเขตค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดและต่ำสุด ที่ได้รับการจัดสรรจากการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง

$$0 \leq P_{D_{ij}}^{B_F} \leq P_{D_{ij}}^{B_F, req} ; i \in I_F, j \in I_F \quad (12)$$

เป็นการบังคับให้ระบบจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงของการทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคง ไม่เกินกว่าที่ตกลงไว้กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคง และต้องจัดสรรไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 MW

ฉ. อสมการขอบเขตค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดและต่ำสุด ที่ได้รับการจัดสรรจากการทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีแบบไม่มั่นคง

$$0 \leq P_{D_{ij}}^{B_{NF}} \leq P_{D_{ij}}^{B_{NF,req}}; i \in I_{NF}, j \in I_{NF} \quad (13)$$

เป็นการบังคับให้ระบบจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงของการทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีแบบไม่มั่นคง ไม่มากไปกว่าที่ตกลงไว้กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าทวิภาคีแบบไม่มั่นคง และต้องจัดสรรไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 MW

ช. ขอบเขตต่ำสุดค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตลาดกลางต้องการ

$$0 \leq P_{D_i}^P; i \in I_{load} \quad (14)$$

เป็นการบังคับค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้รับการจัดสรรของผู้ที่ซื้อกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลาง ไม่ให้มีค่าน้อยกว่า 0 MW

ซ. เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตให้กับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคี

$$\sum_{i \in G} P_{G_{ik}}^M \leq \sum_{i \in G} P_{G_{ik}}^{M,req}; k \in M \quad (15)$$

ฉ. เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าจริงของสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคีที่ได้รับการจัดสรร $P_{D_{jk}}^M$ เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$0 \leq P_{D_{jk}}^M \leq P_{D_{jk}}^{M,req}; j \in D \cap k \in M \quad (16)$$

ญ. เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าจริงที่ตลาดกลางต้องการต้องมีค่าเป็นบวก

$$0 \leq P_{G_i}^P \leq P_{G_i}^{max}; i \in G \quad (17)$$

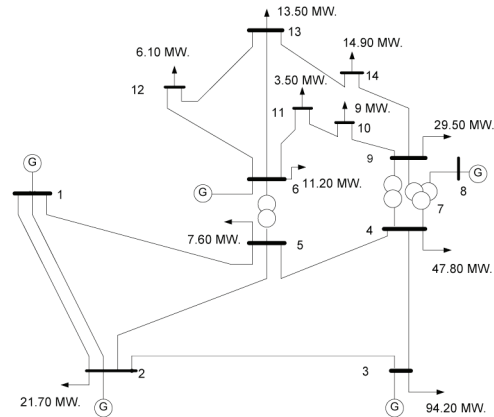
ฎ. เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าจริงของสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคี

$$0 \leq P_{G_{ik}}^M \leq P_{G_i}^{max}; i \in G \cap k \in M \quad (18)$$

3. กรณีศึกษา

การศึกษาวិเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบมีการซื้อขายไฟฟ้าแบบผสมโดยใช้การเสนอราคาปรับลดสัญญาได้นำมาทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 14 บัส ที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 เครื่อง ติด

ตั้งอยู่ที่บัสที่ 1, 2, 3, 6 และบัสที่ 8 ระบบมีสายส่ง 20 เส้นดังแสดงในภาพที่ 3 และระบบมีโหลดรวมทั้งหมด 259 MW



ภาพที่ 3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 14 บัสอยู่ในรูปของสมการ Polynomial กำลัง 2 ดังสมการที่ (14) และแสดงไว้ในตารางที่ 1

$$C_i = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (19)$$

ตารางที่ 1 เส้นโค้งราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส	a	b	c
	\$ / MW	\$ / MW	\$
1	0.020	20	0
2	0.025	30	0
3	0.030	30	0
6	0.025	35	0
8	0.032	32	0

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอกรณีศึกษา 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ระบบไม่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ผู้ซื้อและผู้ขายทำการซื้อขายกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลางเท่านั้น

กรณีที่ 2 ระบบมีการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีกำหนดให้การทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีเสนอราคา

แข่งขันกับการทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคีโดยใช้วิธีเสนอราคาปรับลดแบบกลุ่ม โดยกำหนดให้การแข่งขันเพื่อเสนอราคาเฉพาะสัญญาซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคง

กรณีที่ 3 ระบบมีการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีกำหนดให้การทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีเสนอราคาแข่งขันกับการทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคีโดยใช้วิธีเสนอราคาปรับลดแบบกลุ่ม โดยกำหนดให้การแข่งขันเพื่อเสนอราคาสำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงและไม่มั่นคง

ข้อมูลการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีในกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 เป็นไปตามตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ข้อมูลการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีกรณีที่ 2

บัส	Bilateral Contract			Multilateral Contract		
	มั่นคง (MW)	ไม่มั่นคง (MW)	ราคาเสนอซื้อ (\$/MWh)	k (Group)	PDM (MW)	ราคาเสนอซื้อ (\$/MWh)
1-2	-	-	-	1	20	2.2
1-3	90	-	1.5	-	-	-
1-4	25	-	1.3	2	20	2.4
1-13	-	10	0.2	-	-	-
2-6	-	10	0.2	1	10	2.7
2-14	-	10	0.2	-	-	-
3-9	-	-	-	2	15	2.9
รวม	115	30	-	-	65	-

ตารางที่ 3 ข้อมูลการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีกรณีที่ 3

บัส	สัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี			สัญญาซื้อขายแบบพหุภาคี		
	มั่นคง (MW)	ไม่มั่นคง (MW)	ราคาเสนอซื้อ (\$/MWh)	k (Group)	PDM (MW)	ราคาเสนอซื้อ (\$/MWh)
1-2	-	-	-	1	20	0.5
1-3	90	-	1.3	-	-	-
1-4	25	-	1.1	2	20	0.4
1-13	-	10	0.4	-	-	-
2-6	-	10	0.5	1	10	0.7
2-14	-	10	0.3	-	-	-
3-9	-	10	0.5	2	15	0.3
รวม	115	30	-	-	65	-

4. ผลการคำนวณ

ผลจากการคำนวณ ตามสมการที่ (3) ถึงสมการที่ (18) ของกรณีศึกษาทั้งหมดได้ผลดังต่อไปนี้

4.1 กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบแยกเป็นที่จ่ายให้กับตลาดกลางและจ่ายให้กับการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ของทุกกรณีศึกษา (แสดงในตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6)

4.2 กำลังไฟฟ้าของโหลดแยกเป็นที่ได้รับจากตลาดกลางและจากการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีทุกกรณีศึกษา (แสดงในตารางที่ 7 และตารางที่ 9)

4.3 กำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีทุกกรณีศึกษา (แสดงในตารางที่ 10)

4.4 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีทุกกรณีศึกษา (แสดงในตารางที่ 11)

4.5 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และค่าใช้จ่ายของการจัดสรรกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีทุกกรณีศึกษา (แสดงในตารางที่ 12)

ตารางที่ 4 กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีกรณีที่ 1-3

บัส	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2				กรณีที่ 3				
	P_g^P	P_g^P	P_g^F	P_g^M		P_g^P	P_g^F	P_g^{NF}	P_g^M	
				k1	k2				k1	k2
1	111.57	-	111.58	0.00	0.00	-	115.00	4.27	0.00	0.00
2	34.82	4.83	-	30.00	-	18.28	-	18.40	22.80	-
3	50.00	15.00	-	-	35.00	15.00	-	-	-	35.00
6	43.10	43.14	-	-	-	23.70	-	-	-	-
8	23.88	23.82	-	-	-	11.88	-	-	-	-
รวม	263.37	86.79	111.58	30.00	35.00	68.86	115.00	22.67	22.80	35.00

ตารางที่ 5 กำลังไฟฟ้าของโหลดของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีกรณี 1-3

บัส	กรณีที่ 1				กรณีที่ 2				กรณีที่ 3			
	P_g^P	P_g^P	P_g^F	P_g^M	P_g^P	P_g^F	P_g^{NF}	P_g^M	P_g^P	P_g^F	P_g^{NF}	P_g^M
				k1 k2				k1 k2				
2	21.70	1.70	-	20.00 -	1.70	-	-	20.00 -				
3	94.20	4.20	90.00	- -	4.20	90.00	- -	- -				
4	47.80	6.22	21.58	- 20.00	2.80	25.00	- -	- 20.00				
5	7.60	7.60	-	- -	7.60	-	- -	- -				
6	11.20	1.20	-	10.00 -	0.00	-	8.40	2.80 -				
7	29.50	14.50	-	- 15.00	14.50	-	- -	- 15.00				
8	9.00	9.00	-	- -	9.00	-	- -	- -				
9	3.50	3.50	-	- -	3.50	-	- -	- -				
10	6.10	6.10	-	- -	6.10	-	- -	- -				
11	13.50	13.50	-	- -	9.23	-	4.27	- -				
12	14.90	14.90	-	- -	4.90	-	10.00	- -				

ตารางที่ 6 กำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี

บัส	สัญญาซื้อขายแบบทวิภาคี								สัญญาซื้อขายแบบพหุภาคี			
ส่ง-รับ	มั่นคง				ไม่มั่นคง				พหุภาคี			
	$P_{Dij}^{F, req}$	P_{Dij}^F			$P_{Dij}^{NF, req}$	P_{Dij}^{NF}			K (กลุ่ม)	PDM		
		กรณีที่				กรณีที่				กรณีที่		
1	2	3	1	2	3	1	2	3				
1-2	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	20	20
1-3	90	-	90	90	-	-	-	-	-	-	-	-
1-4	25	-	21.58	25	-	-	-	-	2	-	20	-
1-13	-	-	-	-	10	-	-	4.27	-	-	-	-
2-6	-	-	-	-	10	-	-	8.40	1	-	10	2.80
2-14	-	-	-	-	10	-	-	10				
3-9	-	-	-	-	-	-	-		2	-	15	15
รวม	115	-	111.58	115	30	-	-	22.67	-	65	57.80	

ตารางที่ 7 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี

บัส	กรณีที่ 1			กรณีที่ 2			กรณีที่ 3		
	P	Q	S	P	Q	S	P	Q	S
ส่ง-รับ	(MW)	(MVar)	(MVA)	(MW)	(MVar)	(MVA)	(MW)	(MVar)	(MVA)
1-2	75.00	0.21	75.00	75.00	0.21	75.00	74.99	-1.21	75.00
1-5	36.57	6.18	37.09	36.58	6.13	37.09	44.48	7.37	45.09
2-3	36.74	-5.98	37.22	36.74	-6.01	37.23	41.67	-5.42	42.02
2-4	29.69	4.28	30.00	29.70	4.22	30.00	39.70	4.88	40.00
2-5	20.70	3.15	20.94	20.70	3.09	20.93	30.41	3.95	30.67
3-4	-8.07	15.49	17.47	-8.06	15.46	17.43	-3.30	15.35	15.70
4-5	-38.32	-3.63	38.49	-38.35	-3.58	38.52	-39.93	-2.18	39.99
4-7	4.16	18.54	19.00	4.20	18.24	18.72	15.91	16.85	23.17
4-9	7.31	9.21	11.76	7.32	9.18	11.74	11.59	8.84	14.58
5-6	10.25	4.36	11.14	10.23	4.32	11.10	25.47	5.60	26.08
6-11	12.81	7.95	15.08	12.82	7.93	15.07	10.27	7.87	12.94
6-12	8.64	2.99	9.14	8.64	2.99	9.14	8.31	3.03	8.85
6-13	20.69	9.61	22.81	20.70	9.60	22.82	19.38	9.54	21.60
7-8	-23.88	7.15	24.93	-23.82	6.97	24.82	-11.88	4.47	12.69
7-9	28.04	10.66	30.00	28.02	10.72	30.00	27.80	11.28	30.00
9-10	0.00	0.32	0.32	-0.01	0.34	0.34	-2.45	0.22	2.46
9-14	5.85	1.16	5.96	5.84	1.18	5.96	7.44	1.09	7.52
10-11	-9.00	-5.48	10.54	-9.01	-5.46	10.54	-6.55	-5.58	8.60
12-13	2.44	1.18	2.71	2.44	1.18	2.71	2.11	1.23	2.44
13-14	9.28	4.32	10.24	9.29	4.30	10.24	7.68	4.36	8.83

ตารางที่ 8 กำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าใช้จ่ายของการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบ

	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	4.368	4.367	5.330
ราคา (\$/hr)	7467.56	7472.02	7352.63

ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

กรณีที่ 1 เนื่องจากไม่มีการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคี ผู้ซื้อและผู้ขายกำลังไฟฟ้าซื้อขายกำลังไฟฟ้าผ่านตลาดกลางเท่านั้น โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลางมากที่สุด 111.57 MW คิดเป็น 42.63% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมด เนื่องจาก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 มีราคาต่ำที่สุด และเหตุที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเพียง 111.57 MW เนื่องจากเกิดสถานะเต็มพิกัดของระบบสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 1 กับบัสที่ 2 ดังตารางที่ 7 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 2 ที่มีราคาแพงกว่าได้รับการจัดสรรการผลิตให้กับตลาดกลาง 34.82 MW คิดเป็น 13.22% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดและเหตุที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 2 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเพียง 34.82 MW เนื่องจากเกิดสถานะเต็มพิกัดของระบบสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 2 กับบัสที่ 4 ดังตารางที่ 7 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 50.00 MW คิดเป็น 18.98% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 43.10 MW คิดเป็น 16.36% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมด และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 23.88 MW คิดเป็น 9.07% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดตามลำดับ

กรณีที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ได้รับการจัดสรรการผลิตมากที่สุด 111.58 MW คิดเป็น 42.37% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดเทียบกับกรณีที่ 1 และเกิดสถานะเต็มพิกัดของระบบสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 1 กับบัสที่ 2 เช่นเดิมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้การซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงได้เพียง 111.58 จากความต้องการกำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคง 115 MW ดังตารางที่ 4 และตารางที่ 6 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 2 ได้รับการจัดสรรการผลิตเพียง 34.83 MW คิดเป็น 13.22% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมด และเกิดสถานะเต็มพิกัดของระบบสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 2 กับบัสที่ 4

เช่นกัน โดยแบ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้กับตลาดกลาง 4.83 MW และเป็นค่ากำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคีที่ทำสัญญาซื้อขายกับกลุ่ม k1 จำนวน 30 MW ตามที่ต้องการ ดังตารางที่ 4 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 15.00 MW คิดเป็น 5.7% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมด ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 43.14 MW คิดเป็น 16.38% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 23.82 MW คิดเป็น 9.04% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าบัสที่ 1 ที่ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากับผู้ซื้อบัสที่ 3 ได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้าตามต้องการเนื่องจากมีการเสนอราคาเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญาในราคาที่สูง ดังตารางที่ 2 แต่กำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าบัสที่ 1 ที่ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากับผู้ซื้อบัสที่ 4 ได้ถูกปรับลดกำลังไฟฟ้า และถูกปรับเปลี่ยนให้ไปซื้อกำลังไฟฟ้าจากตลาดกลาง เช่น การซื้อขายกำลังไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าบัสที่ 1 และผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 4 ซึ่งได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้า 21.58 MW จากความต้องการกำลังไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคง 25 MW ดังตารางที่ 2 และตารางที่ 5 ส่วนกำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าบัสที่ 1 กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 2 ทำสัญญาซื้อขายกำลังไฟฟ้ากลุ่ม k1 จำนวน 20 MW ได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าบัสที่ 2 จากการร่วมกันผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 และบัสที่ 2 เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ซื้อไฟฟ้าบัสที่ 2 และบัสที่ 6 จากความต้องการกำลังไฟฟารวม 30 MW

ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 โดยแบ่งเป็นกำลังไฟฟ้าเพื่อผลิตให้กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าที่บัส 2 จำนวน 20 MW และผลิตให้กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าที่บัส 6 จำนวน 10 MW ตามที่ผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคีต้องการ ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ส่วนกำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าบัสที่ 1 กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 4 ทำสัญญาซื้อขายกำลังไฟฟ้ากลุ่ม k2 จำนวน 20 MW ได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าบัสที่ 3 จากการร่วมกันผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 และบัสที่ 3 เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ซื้อไฟฟ้าบัสที่ 4 และบัสที่ 9 จากความต้องการกำลังไฟฟารวม 35 MW ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 โดยแบ่งเป็นกำลังไฟฟ้าเพื่อผลิตให้กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าที่บัส 4 จำนวน 20 MW และผลิตให้กับผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าที่บัส 9 จำนวน 15 MW ตามที่ผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคีต้องการ ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 สาเหตุที่ผู้ผลิตไฟฟ้าบัสที่ 1 ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคี เนื่องจากผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคีแบบมั่นคง นอกจากนี้ยังเกิดสถานะเต็มพิกัดของระบบสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 1 กับบัสที่ 2 และเกิดสถานะเต็มพิกัดของระบบสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 2 กับบัสที่ 4 ดังตารางที่ 7 ตามลำดับ

กรณีที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ได้รับการจัดสรรการผลิตมากที่สุด 119.27 MW คิดเป็น 45.12% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมด โดยแบ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบมั่นคง 115.00 MW ตามที่ผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบมั่นคงต้องการ และเป็นค่ากำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคง 4.27 MW จากความต้องการกำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคง 10 MW ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 4

เหตุที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเพียง 119.27 MW เนื่องจากเกิดสถานะเต็มพิกัดของระบบสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 1 กับบัสที่ 2 ดังตารางที่ 7 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 2 ได้รับการจัดสรรการผลิต 36.68 MW โดยแบ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้กับตลาดกลาง 18.28 MW และเป็นค่ากำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคง 18.40 MW ดังตารางที่ 4 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 15.00 MW คิดเป็น 5.67% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 23.70 MW คิดเป็น 8.97% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ได้รับการจัดสรรการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับตลาดกลาง 11.88 MW คิดเป็น 4.49% ของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมดตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบมั่นคงได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้าตามผู้ทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบมั่นคงต้องการทุกสัญญา ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 5 ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคงนั้นขึ้นอยู่กับราคาเสนอเพื่อไม่ให้รับลดสัญญา ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 การซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคงของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าบัสที่ 1 และผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 13 ซึ่งได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้า 4.27 MW จากความต้องการกำลังไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคง 10 MW ส่วนการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคงของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าบัสที่ 2 และผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 6 ซึ่งได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้า 8.40 MW จากความต้องการกำลังไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคง 10 MW ส่วนการซื้อขายกำลังไฟฟ้าแบบพหุภาคีแบบไม่มั่นคงของผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าบัสที่ 2 และผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 14 ได้รับการจัดสรร

ตามความต้องการ ดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 หากพิจารณาระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าที่บัส 2 กับผู้ซื้อไฟฟ้าที่บัส 6 เปรียบเทียบกับผู้ผลิตไฟฟ้าที่บัส 2 กับผู้ซื้อไฟฟ้าที่บัส 14 ดังตารางที่ 3 มีการเสนอราคาเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญาของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 14 ราคา 0.3 \$/MW ซึ่งราคาดังกล่าวต่ำกว่าราคาเสนอซื้อเพื่อไม่ให้ปรับลดสัญญาของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าบัสที่ 6 จำนวน 0.2 \$/MW นอกจากนี้ผู้ซื้อไฟฟ้าบัสที่ 14 อยู่ไกลกว่าผู้ซื้อไฟฟ้าบัสที่ 6 แต่เนื่องจากผู้ซื้อไฟฟ้าบัสที่ 14 ทำสัญญากับผู้ผลิตไฟฟ้าเพียงรายเดียว จึงได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการโดยไม่ถูกตัดโหลดส่วนการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบพหุภาคีกลุ่ม k1 และ k2 ทำสัญญาซื้อขายกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 และเสนอราคาต่ำกว่ากรณีที่ 2 ดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 หากพิจารณาจะเห็นว่ากลุ่ม k1 เสนอราคาปรับลดแบบกลุ่มสูงกว่ากลุ่ม k2 แต่เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ขึ้นเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 และ 2 ดังตารางที่ 7 และได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้า 22.80 MW จากความต้องการกำลังไฟฟ้าของการทำธุรกิจไฟฟ้าพหุภาคี 30 MW และถูกปรับเปลี่ยนให้ไปซื้อกำลังไฟฟ้าจากตลาดกลาง 7.20 MW ส่วนกลุ่ม k2 ได้รับจัดสรรกำลังไฟฟ้าตามความต้องการและผู้ผลิตไฟฟ้าที่บัส 3 ผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ซื้อไฟฟ้าที่บัส 4 และบัส 9 ดังตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6

5. สรุปผลการวิจัย

บทความฉบับนี้เป็นการศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหาสถานะเกินพิกัดของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีในตลาดการซื้อขายไฟฟ้า โดยใช้หลักการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดภายใต้สัญญาการซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี 2 แบบ คือ สัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคงและสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง โดยมีการเสนอราคาเพื่อไม่ให้ปรับ

ลดสัญญาสำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบมั่นคงและสำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคีแบบไม่มั่นคง การศึกษาดังกล่าวใช้โปรแกรม MATLAB มาทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE14 บัส โดยการวิเคราะห์กำลังการผลิต การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง รวมถึงข้อจำกัดต่างๆ ของระบบ กำลังไฟฟ้าที่ทำการซื้อขายแบบทวิภาคี/พหุภาคีที่ได้รับการจัดสรรผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ถ้าระบบเกิดการติดขัดของสายส่ง จนไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ตามสัญญาที่ซื้อขายไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีศูนย์ควบคุมไฟฟ้าอิสระ (Independent System Operator : ISO) จะต้องใช้วิธีเสนอราคาปรับลดแบบกลุ่ม (Group Curtailment Bids) สำหรับสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบพหุภาคี เพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดสถานะเกินพิกัดของระบบ ซึ่งผู้ซื้อขายไฟฟ้าพหุภาคีต้องเสนอราคาที่สูงเพื่อแข่งขันกับผู้ซื้อขายไฟฟ้าทวิภาคีแบบมั่นคงเพื่อไม่ให้ถูกปรับลดสัญญาซื้อขายไฟฟ้า และถ้าผู้ซื้อขายไฟฟ้าพหุภาคีถูกปรับลดสัญญา ซึ่งส่งผลให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าลดลงจากสัญญาที่ได้ตกลงไว้ ผู้ซื้อขายไฟฟ้าพหุภาคีจำเป็นต้องซื้อขายไฟฟ้าในตลาดซื้อขายไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับปริมาณกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการ โดยที่โหลดรวม ณ บัสใดๆ จะมีค่าคงที่และไม่มีการตัดโหลด

การศึกษาต่อไปสามารถศึกษาการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีในตลาดการซื้อขายไฟฟ้า โดยใช้หลักการคำนวณด้วยวิธีอื่นรวมไปถึงการคิดราคาสายส่งด้วยราคาที่บัส รายได้ของผู้ผลิต รายจ่ายของผู้ซื้อ เพื่อศึกษาผลกระทบและแนวทางการแก้ไขปัญหาสถานะเกินพิกัดของการทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคี/พหุภาคีให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] จตุรวิทย์ บุชรา.2554. การจัดการสถานะเกินพิกัดของระบบสายส่งในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบผสม

โดยใช้การเสนอราคาไม่ให้เกิดผลสัญญา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] ณรงค์ศักดิ์ เรืองโณม. 2551. การทำธุรกิจไฟฟ้าแบบทวิภาคีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในด้านการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและค่าใช้สายส่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[3] พรเทพ ปัญญาแก้ว. 2556. การจัดสรรค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่มีราคาเสนอขายแบบขั้นบันไดในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าแบบรวมศูนย์กลางร่วมกับทวิภาคีและพหุภาคีโดยใช้วิธีการคำนวณแบบผสม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ : 20 ฉบับที่ : 3 : 48-63

[4] เอกสกล เทพสุภรณ์กุล. 2547. การศึกษาการซื้อขายไฟฟ้านอกตลาดกลางในตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรี วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[5] Galina, F.D., Kockar I., and Franco. P.C., 2002. "Combined pool/bilateral dispatch – path I : performance of Trading strategies," *IEEE Transactions on Power Systems*. 17 : 92-99.

[6] Galina F.D. and Kockar I. 2002. "Combined pool/bilateral dispatch – path II: curtailment of

firm and nonfarm Contract," *IEEE Transactions on Power Systems*. 17 : 1184-1190.

[7] New York Independent System Operator, USA. available online : <http://www.nyiso.com>

[8] Padhy N. P., Sood Y.R., Moamenand A., Kumar M. and Gupta H.O. 2002. "A hybrid model for Congestion management with real and reactive power transaction," *IEEE Trans. Power Systems*. 1 : 1-7.

[9] Fang R.S., David A.K. 1999. "Optimal Dispatch Under Transmission Contracts," *Proc. IEEE Transaction on Power System*, Vol. 14, No. 2, May, 1999.

[10] Shahidehpour, M., Yamin H., and Li. Z., 2002. "Market Operations in Electric Power Systems : Forecasting Scheduling and Risk Management," John Wiley & Sons, Inc

[11] Singh H., Hao S. and Papalexopoulos A. 1998. "Transmission congestion management in competitive electricity Markets," *IEEE Trans. Power Systems*. 132 : 672-680