

ประกายเพชร ม่วงเขียว : การเพิ่มประสิทธิภาพของกรอบการดำเนินงานหลายตลาดสำหรับตลาดไฟฟ้า พร้อมกลไกการปล่อยมลพิษ ใบรับรองพลังงานหมุนเวียน และบริการเสริมความมั่นคง (OPTIMISED MULTI-MARKET FRAMEWORK FOR ELECTRICITY WITH EMISSION MECHANISMS, RENEWABLE ENERGY CERTIFICATES, AND ANCILLARY SERVICES)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ, 200 หน้า

คำสำคัญ : บริการเสริมความมั่นคงระบบไฟฟ้า, กลไกราคาคาร์บอน, ตลาดไฟฟ้าแบบบูรณาการ, การส่งกำลังไฟฟ้าเชิงเหมาะสมที่สุด, ใบรับรองพลังงานหมุนเวียน, ระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

ภาคพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานคิดเป็นสัดส่วนเกือบ 40% ของการปล่อยทั่วโลก ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นเร่งด่วนของการกำหนดนโยบายเพื่อสนับสนุนการลดคาร์บอนในภาคพลังงาน กลไกการกำหนดราคาคาร์บอน การสร้างรายได้จากใบรับรองพลังงานหมุนเวียน และตลาดบริการเสริมความมั่นคงระบบไฟฟ้าได้รับการนำมาใช้โดยหน่วยงานกำกับดูแลและรัฐบาลเพื่อสร้างแรงจูงใจในการลดการปล่อยและเพิ่มความมั่นคงของระบบ อย่างไรก็ตามการดำเนินงานของแต่ละกลไกอย่างแยกส่วนก่อให้เกิดความซ้ำซ้อน การประสานงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ และการจัดสรรทรัพยากรที่ไม่เหมาะสม

งานวิจัยนี้เสนอกรอบการดำเนินงานของการส่งกำลังไฟฟ้าเชิงเหมาะสมที่สุดแบบบูรณาการ ซึ่งผสานตลาดไฟฟ้าเข้ากับกลไกราคาคาร์บอน รายได้จากใบรับรองพลังงานหมุนเวียน และการจัดหาบริการเสริมความมั่นคงระบบไฟฟ้าภายใต้แบบจำลองการเหมาะสมที่สุดเพียงหนึ่งเดียว การวิเคราะห์ในรูปแบบหลายสถานการณ์ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบจากการบูรณาการตลาดอย่างเป็นลำดับเริ่มจากการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการส่งกำลังไฟฟ้าและการจัดเก็บภาษีคาร์บอนภายใต้กลไกราคาแบบสปอต จากนั้นได้ขยายไปสู่การพิจารณาแหล่งพลังงานหมุนเวียนและการซื้อขายใบรับรองพลังงานหมุนเวียนเพื่อประเมินผลเชิงเสริมของกลไกด้านสิ่งแวดล้อมคู่ขนาน ก่อนจะเพิ่มเติมตลาดบริการเสริม โดยให้ความสำคัญกับโปรแกรมตอบสนองด้านความต้องการพลังงานที่สามารถให้บริการสำรองกำลังหมุนได้เมื่อไม่อยู่ในช่วงลดโหลด สุดท้ายจึงนำเสนอกรอบการดำเนินงานตลาดแบบหลายมิติที่ผสานตลาดไฟฟ้า กลไกราคาคาร์บอน ตลาดพลังงานหมุนเวียน และตลาดบริการเสริมความมั่นคงระบบไฟฟ้าให้ทำงานร่วมกัน

ผลการวิจัยมีส่วนสำคัญสามประการ ได้แก่ ประการแรกการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงบูรณาการเพื่อประสานกลไกตลาดหลายมิติ ประการที่สองการลดต้นทุนการดำเนินงานระบบรวมภายใต้กรอบการประมวลผลทางเดียวโดยคำนึงถึงภาษีคาร์บอน รายได้จากใบรับรอง

พลังงานหมุนเวียนและข้อกำหนดของบริการเสริม และประการสุดท้ายการเพิ่มค่าสวัสดิการทางสังคม ภายใต้กรอบการประมูลสองทางที่ทั้งผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่ายไฟฟ้ามีบทบาทเป็นผู้เข้าร่วมตลาดอย่างแท้จริง นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบระหว่างการดำเนินตลาดแบบแยกส่วนและแบบบูรณาการ เพื่อประเมินประสิทธิผลของกรอบที่เสนอ พร้อมประยุกต์ใช้เทคนิคการหาคำตอบเชิงเหมาะสมที่สุดที่หลากหลาย ทั้งวิธีเชิงกำหนดแบบดั้งเดิม วิธีเชิงสุ่มแบบเมตาฮิวริสติก รวมถึงวิธีแบบผสมผสานที่ผนวกความสามารถในการค้นหาคำตอบเชิงโลกของเมตาฮิวริสติกเข้ากับความแม่นยำในการปรับแต่งเชิงเฉพาะที่ของวิธีเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพของการคำนวณ

การตรวจสอบเชิงตัวเลขได้ดำเนินการบนระบบทดสอบ IEEE 30 บัสเพื่อยืนยันความถูกต้องของอัลกอริทึม และระบบไฟฟ้าเทียบเท่า 160 บัสของประเทศไทยเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้จริง ระบบไฟฟ้าของประเทศไทยถือเป็นกรณีศึกษาที่มีความสำคัญ เนื่องจากตลาดการส่งกำลังไฟฟ้า การบัญชีคาร์บอน กลไกพลังงานหมุนเวียน และตลาดบริการเสริมยังคงดำเนินงานแยกจากกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ากรอบแบบบูรณาการสามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้เกือบ 5% สร้างการกระจายผลประโยชน์อย่างเป็นธรรมระหว่างผู้บริโภค ผู้ผลิต รัฐบาล และผู้ผลิตพลังงานหมุนเวียน รวมทั้งเพิ่มความมั่นคงของระบบเมื่อเทียบกับแนวทางตลาดแยกส่วน นอกจากนี้ การบูรณาการตลาดยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกลไกราคาคาร์บอนและส่งเสริมความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของพลังงานหมุนเวียนผ่านการซื้อขายใบรับรองพลังงานหมุนเวียนที่มีการประสานงานอย่างเหมาะสม อีกทั้งการวิเคราะห์ความไวนั้นยืนยันว่าการประสานกลไกตลาดแบบหลายมิติสามารถลดข้อจำกัดและความขัดแย้งระหว่างประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ ความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม และความมั่นคงของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันจะนำไปสู่แนวทางการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบไฟฟ้าคาร์บอนต่ำของประเทศไทยที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

PRAKAIPECTH MUANGKHIEW : OPTIMISED MULTI-MARKET FRAMEWORK FOR
ELECTRICITY WITH EMISSION MECHANISMS, RENEWABLE ENERGY CERTIFICATES,
AND ANCILLARY SERVICES

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. KEERATI CHAYAKULKHEEREE, D.Eng., 200 PP.

Keyword : ancillary services, carbon pricing mechanism, integrated electricity market,
optimal power dispatch, renewable energy certificates, Thai power system

The power sector accounts for nearly 40% of global energy-related carbon dioxide emissions, underscoring the need for urgent policy interventions to support decarbonisation. Carbon pricing mechanisms, renewable energy certificates revenue, and ancillary service markets have been introduced by governments and regulators to incentivise emission reductions and enhance system reliability. However, market fragmentation, coordination inefficiencies, and suboptimal resource allocation result from the independent operation of these mechanisms.

This research proposes a unified optimal power dispatch framework integrating electricity markets with carbon pricing mechanisms, REC revenue, and ancillary service procurement within a single optimisation model. A progressive multi-scenario analysis is employed to evaluate the impacts of market integration systematically. The fundamental interaction between energy dispatch and carbon taxation under spot-pricing mechanisms is examined first. Renewable energy sources and REC trading are subsequently incorporated to assess the synergies from dual environmental incentives. Ancillary service markets are then introduced, with particular emphasis on incentive-based demand response programmes capable of providing spinning reserves when not actively curtailing load. Finally, a comprehensive multi-dimensional market-clearing framework simultaneously coordinating the electricity market, carbon pricing mechanism, renewable energy market, and ancillary services market is presented.

Three principal research contributions are established through this investigation. A unified mathematical optimisation model coordinating multiple market dimensions is formulated. Total system operational costs under single-sided auction frameworks are minimised whilst accounting for carbon tax liabilities, REC revenues,

and ancillary service requirements. Social welfare is maximised under double-sided auction frameworks, where both generation companies and distribution companies participate as active market agents. A comparative analysis of segregated and integrated market-clearing approaches is conducted to demonstrate the framework's effectiveness. Multiple optimisation techniques are employed to ensure robust solutions and computational efficiency. Classical deterministic methods provide baseline solutions with guaranteed optimality for convex formulations. Stochastic optimisation algorithms are applied to handle non-convex problem characteristics and explore diverse solution spaces. A hybrid PSO-QP approach combining the global search capability of metaheuristics with the local refinement precision of classical methods is developed, offering improved solution quality and computational performance.

Numerical validation is conducted using the IEEE 30-bus test system for algorithmic verification and the 160-bus equivalent Thai power system for practical applicability assessment. The Thai system represents a particularly relevant case study, given that energy dispatch, carbon accounting, renewable energy incentives, and ancillary service procurement currently operate as segregated mechanisms. Substantial emission reductions approaching 5%, equitable welfare distribution among consumers, producers, government, and renewable energy participants, and enhanced system reliability compared to fragmented market approaches are demonstrated through simulation results. The environmental effectiveness of carbon pricing is amplified, and the economic viability of renewable energy deployment through coordinated REC trading is strengthened by market integration, as confirmed through sensitivity analyses. The inherent trade-offs between economic efficiency, environmental sustainability, and system security that characterise isolated policy instruments can be resolved through multi-dimensional market coordination, thereby supporting more effective pathways toward carbon neutrality in Thailand's power sector.

School of Electrical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature
Advisor's Signature