The EECON-30 Conference Joins the Eighteenth Birthday Anniversary

Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

# 30th Electrical Engineering Conference

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

## หนังสือรวมบทคัดย่อของบทความที่นำเสนอในการประชุม

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบความคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

โดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

## คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี

25 - 26 ตุลาคม 2550

Seagate ABB NECTEC TOT

FACULTY OF ENGINEERING KMUTT EECON - 30

# คณะกรรมการ
## การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 ประจำปี พ.ศ. 2550

### ประธานกรรมการ

| | | |
|---|---|---|
| รศ.ดร.โกสินทร์ | จำนงไทย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

### กรรมการ

| | | |
|---|---|---|
| อ.บุญช่วย | ทรัพย์มนชัย | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ผศ.ดร.ศิริโรจน์ | สิริสุขประเสริฐ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผศ.วิญญู | แสวงสินกสิกิจ | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |
| ดร.กิตติพงษ์ | มีสวาสดิ์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| อ.ยศนัย | ศรีอุทัยศิริวงศ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| ดร.ศุภกิตติ์ | โชติโก | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ผศ.ดร.เผ่าภัค | ศิริสุข | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| อ.ศิริชัย | แดงเอม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| ดร.พรระพีพัฒน์ | ภาสบุตร | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| รศ.ดร.ศุภชัย | ไพบูลย์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รศ.เวคิน | ปียรัตน์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| อ.มงคล | แซ่เจีย | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| ผศ.ดร.สุพัฒน์ | กิตติรัตน์สัจจา | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.วรา | วราวิทย์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ | อุตตมากร | มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ |
| ผศ.บุญเลิศ | สื่อเฉย | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| อ.สมชาย | ปุญญนิรันดร์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| อ.โสภา | แซ่เฮ้ง | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| ดร.วันชัย | ฉิมฉวี | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ดร.ธนพัฒน์ | สิทธิธรรมวัติ | มหาวิทยาลัยสยาม |
| ผศ.ดร.กีรติ | ชยะกุลคีรี | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |

## กรรมการสมทบ

| | | |
|---|---|---|
| ดร.ณัฐภพ | นิ่มปีติวัน | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| ผศ.ปรีชา | สาคะรังค์ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| อ.ยิ่งรักษ์ | อรรถเวชกุล | มหาวิทยาลัยราชธานี |
| ดร.เกียรติศักดิ์ | ศรีพิมานวัฒน์ | ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ |
| อ.คมสันต์ | ดาโรจน์ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| ดร.สมพร | เรืองสินชัยวานิช | มหาวิทยาลัยนเรศวร |

## เลขานุการ

| | | |
|---|---|---|
| ดร.ศุภกิตติ์ | โชติโก | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

## ผู้ช่วยเลขานุการ

| | | |
|---|---|---|
| รศ.ดร.เรืองรอง | สุลีสถิระ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

## กรรมการที่ปรึกษา

| | | |
|---|---|---|
| รศ.ดร.เอก | ไชยสวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ผศ.ดร.ปิยะบุตร | วานิชพงษ์พันธุ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ผศ.อุดมศักดิ์ | ยั่งยืน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ผศ.ดร.ภาณุทัต | บุญประมุข | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ดร.สุเทพ | มาดารัศมี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ผศ.ดร.วุฒิชัย | อัศวินชัยโชติ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

# PW3-2

## วันพฤหัสบดีที่ 25 ตุลาคม 2550 เวลา 14:50 น. – 16:50 น.

**ห้อง :** Emerald

**ประธานกลุ่มย่อย :** ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**PW-31** **เวลา 14:50-15:10 น.**

**Transmission Pricing for Enhanced Single Buyer Model in the Thai Electricity Supply Industry**

*Cattareeya Adsoongnoen Weerakorn Ongsakul Thanapong Suwanasri*

"This paper proposes a transmission pricing for the Enhanced Single Buyer model in the Thai Electricity Supply Industry. The transmission pricing comprises three components; Transmission Use-of-System charge (TUoS), connection charge, and common service charge. The original TUoS charge is a uniform tariff for each voltage level. It does not send incentive signal to the transmission users depending on system usage and congestion. The sensitivity method is proposed to deliver the incentive signal to the users by multiplying the original TUoS tariff with the nodal sensitivity index for each connecting point. Both, active and reactive power are taken into consideration by analyzing MVA-flow via the transmission lines. The Thai 424-bus power system demonstrates the method exemplarily."

**PW-32** **เวลา 15:10-15:30 น.**

**การประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า**

*ณัฐพล ตาทิคุณ กุลยศ อุดมวงศ์เสรี*

"ความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (Total Transfer Capability, TTC) เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถส่งผ่านระบบไฟฟ้ากำลังโดยที่ระบบยังคงทำงานเป็นปกติ และไม่ละเมิดขีดจำกัดใดๆ จนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการคำนวณค่า TTC เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านั้นมีข้อจำกัดที่ต้องอาศัยเวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก บทความนี้ นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่า TTC ด้วยวิธี Two-Step ซึ่งแบ่งการคำนวณออกเป็นสองขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรก เป็นการทำนายขีดจำกัดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าต่อจาก นั้น จะนำขีดจำกัดที่ทำนายได้ไปใช้ในการคำนวณค่า TTC อย่างละเอียดในขั้นตอนที่สองต่อไป เมื่อทำการทดลองใช้วิธีการที่นำเสนอกับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 4 บัส 9บัส 14 บัส และ IEEE-118 บัส ปรากฏว่า ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิม เป็นที่น่าพอใจ"

**PW-33** **เวลา 15:30-15:50 น.**

**Distributed Slack Bus Power Flow Part I: Mathematical Model and Framework**

*Keerati Chayakulkheeree Wichit Kleaursuk Punyarak Khamklar Worapong Pirindra*

"This paper presents the mathematical model and test example of distributed slack bus power flow (DSPF) program. The method can diversify the power imbalance to voltage controlled buses in the system via participation factor. Therefore, the automatic generation controls (AGC) of the generators can be incorporated in this power flow model. The DSPF is tested with the IEEE 30 bus system. Numerical results shown that the method can effectively represent the generation control characteristics to the power flow model and potentially be applied to the overcoming competitive electricity supply industry."

**PW-34** **เวลา 15:50-16:10 น.**

**Distributed Slack Bus Power Flow Part II: Prospect and Challenge for Competitive Environments**

*Keerati Chayakulkheeree Nimit Boonpirom Pasawee Srimood Prakit Liengpradis*

"This paper introduces an application of distributed slack bus power flow to competitive electricity supply industry (ESI). The participation factors of the generators are obtained by the weighted average of AGC accepted quantities in the ancillary services market. The results shows that the proposed method can satisfactory represent the system behavior that all generators are response to power imbalance. In addition, the proposed method results in the better justified AGC setting in competitive electricity market than that of using single slack bus power flow."

**PW-35** **เวลา 16:10-16:30 น.**

**An Investigation Study on Fuzzy Line Flow Limit Constraints in Competitive Electricity Markets**

*Keerati Chayakulkheeree Kasidaj TipamornwiwatEakarat Plunoi ChairatWisutirat Paradorn Raungkool*

"In this paper, the fuzzy set theory is applied to model the soft constraint limits. The fuzzy constrained optimal dispatch is formulated as a fuzzy optimization problem and converted into a crisp optimization problem. An efficient successive linear programming method is then modified to solve the new problem. Numerical test results on IEEE 30-bus system show that the fuzzy constrained method could give a good trade-off between reducing generation cost and satisfying constraints, and produce more realistic generation schedules when a feasible solution cannot be obtained by using the crisp OPF."

**PW-36** **เวลา 16:30-16:50 น.**

**การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างเหมาะสมโดยไม่ขึ้นกับบัสอ้างอิงของระบบ**

*กรณ์ พงษ์ตุ้มภัย กุลยศ อุดมวงศ์เสรี*

"ในปัจจุบันที่ความต้องการไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่เชื้อเพลิงซึ่งเป็นต้นทุนหลักก็มีราคาสูงขึ้นเช่นกัน การผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการโดยที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดจึงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ อย่างไรก็ดี วิธีการเหล่านั้นก็มีข้อจำกัดที่ผลการจัดสรรกำลังการผลิตขึ้นกับการเลือกบัสอ้างอิงในขั้นตอนของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบดังนั้นผลเฉลยที่ได้จากวิธีดังกล่าวยังไม่อาจเรียกได้ว่าเป็นผลการจัดสรรกำลังที่เหมาะสมมากที่สุดจริง บทความนี้จะนำเสนอวิธีการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมโดยที่ผลเฉลยที่ได้จะไม่ขึ้นอยู่กับการเลือกบัสอ้างอิงในระบบ ซึ่งเราอาจจะสรุปได้ว่าผลการจัดสรรกำลังการผลิตที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอนี้เป็นวิธีที่คุ้มค่าและมีต้นทุนต่ำที่สุด"

# PW3-4

## วันศุกร์ที่ 26 ตุลาคม 2550 เวลา 10:30 น. – 12:10 น.

**ห้อง :** Emerald

**ประธานกลุ่มย่อย :** ผศ.ดร. กีรติ ชยะกุลคีรี มหาวิทยาลัยศรีปทุม

**PW-83** **เวลา 10:30-10:50 น.**

**การออกแบบและสร้างอินทิเกรเตอร์แบบชดเชยชนิดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุหลายชั้น**

*ธนากร เพ็ญทอง ธนสิทธ์ หลิ่มสิริอนุสรณ์ ณัฐพงษ์ ครละคร นฤพนธ์ คีจริง พีรวุฒิ ยุทธโกวิท นรเศรษฐ พัฒนเดช มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์*

"บทความนี้ได้นำเสนอวิธีสการออกแบบสร้างอินทิเกรเตอร์แบบชดเชยชนิดตัวต้านทานและเก็บประจุแบบหลายชั้น เพื่อใช้ในระบบวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาแบบชั่วขณะ ซึ่งความผิดพลาดในการวัดเกิดจากช่วงเวลาบริเวณหางคลื่นมีค่าลดลง ในการทดสอบได้ทำการเปรียบระหว่างอินทิเกรเตอร์ชนิดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแบบเดิมหรือแบบ 1 ชั้น ด้วยการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์กับการทดสอบจริงเมื่อนำอินทิเกรเตอร์ไปใช้งานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี ผลการทดสอบอินทิเกรเตอร์ที่ทำการออกแบบสร้างขึ้นใหม่มีความผิดพลาดในการวัดเวลาหางคลื่นน้อยกว่า 1 %"

**PW-84** **เวลา 10:50-11:10 น.**

**ผลของความชื้นต่อการเกิดเบรกดาวน์ไฟฟ้า กระแสตรงขั้วลบในแกปแท่ง-ระนาบและแกปทรงกลม-กลม**

*กิตติศักดิ์ ศรีสวัสดิ์ ศุภกิตติ์ ไชติโก ณัฐวุฒิ ชยาวนิช*

"บทความนี้ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของผลของความชื้นใน อากาศมีผลกระทบอย่างไรต่อการเกิดเบรกดาวน์ไฟฟ้า กระแสตรงขั้วลบ ตามมาตรฐาน IEC 60-1 (1989) ที่ซึ่งประเทศไทยบางครั้งมีความชื้น สัมบูรณ์ที่สภาวะความหนาแน่นมาตรฐานหรือ h/$\delta$ มีค่าสูงเกินขอบเขตการ ยอมรับการใช้สมการปรับแก้สภาวะบรรยากาศสำหรับไฟฟ้า กระแสตรงที่ไม่ เกิน13 g/m3 (อ้างอิงที่ 20°C, 1,013 mbar) เพื่อให้เกิดความชัดเจนจึงได้อ้างอิง แนวทางการศึกษาและขั้นตอนการปฏิบัติต่างๆตามมาตรฐาน IEC 60-1 (1989) การทดสอบได้เลือกวิธีแบบหลายระดับ (Multiple level) เพื่อทดสอบหาค่า แรงดัน U50% ที่ความชื้นต่างๆกัน ตัวนำทดสอบชนิดแกปทองแดงชนิดแท่ง ปลายแหลม-ระนาบมีระยะแกปทดสอบที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 cm และตัวนำแกป ทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm มีระยะแกปที่ 1, 1.5, 2 และ 2.4 cm"

**PW-85** **เวลา 11:10-11:30 น.**

**ผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อคุณสมบัติการฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง**

*นรงฤทธิ์ เสนาจิตร ไชยพร หล่อทองคำ*

"บทความฉบับนี้เป็นรายงานการศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อคุณสมบัติการฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง โดยได้ออกแบบชุดทดสอบ (Test Cell) และใช้เกณฑ์การทดสอบเก็บผลเชิงสถิติตามมาตรฐาน ASTM ทำการทดสอบหาค่าความคงทนฉนวนน้ำมันหม้อแปลงด้วยชุดอิเล็กโตรด 2 แบบ คือ แบบระนาบ-ระนาบ และ แบบทรงกลม-ทรงกลม ทดสอบเปรียบเทียบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 $\mu$s และแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ระดับความชันหน้าคลื่น 2 ช่วง คือ 2500 – 3000 kV/$\mu$s และ 3500 – 4000 kV/$\mu$s ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปของค่าแรงดันเบรกดาวน์เชิงสถิติและในรูปของกราฟแสดงคุณลักษณะสมบัติแรงดัน-เวลา (v-t curve) ผลที่ได้พบว่าทั้งค่าแรงดันเบรกดาวน์และเส้นเขตอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลงกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจะมีค่าสูงกว่ากรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน โดยไม่ขึ้นกับรูปทรงอิเล็กโตรดที่ทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ"

**PW-86** **เวลา 11:30-11:50 น.**

**การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุมาตรฐานเพื่อใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับ**

*สุชาติ มณฑปไหญ่ เกริก แซ่เลื่อง ฐิติพงษ์ เจียงสุขใส จิราวุ จันทร์ชู ณัฐพันธ์ บุญเสนอ*

"บทนี้นำเสนอ การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซ พิกัด 17 pF 200kV ซึ่งตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นนี้จะสามารถใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับด้วยหลักการโวลเตจดิไวเดอร์ และหลักการซับและไฟเทสคิว ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบได้ใช้การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยศึกษาพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตัวเก็บประจุก่อนที่มีการสร้าง และทดลองจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งในส่วนการทดลองความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับและอัตราส่วนลดทอนแรงดันที่คงที่ เมื่อใช้ตัวเก็บประจุนี้ในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ"

**PW-87** **เวลา 11:50-12:10 น.**

**การเปรียบเทียบการตรวจจับสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยอุปกรณ์คาบเกี่ยวกับการใช้สายอากาศที่สร้างขึ้นและสายอากาศมาตรฐาน VHF/UHF**

*ประวิทย์ เพ็ชรผึ้ง มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ นรเศรษฐ พัฒนเดช พีรวุฒิ ยุทธโกวิท*

"บทความวิจัยนี้นำเสนอการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศมาตรฐานและสายอากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นเปรียบเทียบกับ วิธีดั้งเดิม (Conventional method) โดยจำลองวัสดุที่ผิดพร่องขึ้น 3 ลักษณะ คือ โคโรน่าดิสชาร์จ ดิสชาร์จภายใน และดิสชาร์จตามผิว แล้วทำการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สำหรับ การตรวจวัดด้วยสายอากาศจะทำการตรวจวัดในห้องชีลด์ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยการตรวจวัดแบบดั้งเดิมนั้นขนาดของดิสชาร์จบางส่วนจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ป้อน ส่วนมุมเฟสที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของความผิดพร่อง ในกรณีการตรวจวัดด้วยสายอากาศมาตรฐานและสายอากาศที่ออกแบบนั้นจะมีความสอดคล้องกันกล่าวคือขนาดของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันทดสอบ ส่วนความถี่ที่เกิดขึ้นของดิสชาร์จบางส่วนของการเกิดความผิดพร่องแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยที่ ค่าความถี่ของโคโรน่าดิสชาร์จปรากฏเด่นชัดภายในช่วงความถี่ 60 MHz ถึง 200 MHz ดิสชาร์จภายในมีความถี่ตั้งแต่ 40 MHz ถึง 80 MHz และดิสชาร์จตามผิวมีช่วงความถี่ที่สามารถตรวจวัดได้ 50 MHz ถึง 100 MHz และช่วงความถี่ 150 MHz ถึง 250 MHz เป็นช่วงความที่ปรากฏชัดเจน ซึ่งกล่าวในเบื้องต้นได้ว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นนี้สามารถตรวจวัดสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้"

# Distributed Slack Bus Power Flow
# Part II: Prospect and Challenge for Competitive Environments

Keerati Chayakulkheeree, Nimit Boonpirom, Pasawee Srimood, and Prakit Liengpradis
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Sripatum University, Bangkok, Thailand, E-mail: keerati.ch@spu.ac.th

**Abstract**

This paper introduces an application of distributed slack bus power flow to competitive electricity supply industry (ESI). The participation factors of the generators are obtained by the weighted average of AGC accepted quantities in the ancillary services market. The results shows that the proposed method can satisfactory represent the system behavior that all generators are response to power imbalance. In addition, the proposed method results in the better justified AGC setting in competitive electricity market than that of using single slack bus power flow.

**Keywords:** Electricity Supply Industry, Automatic Generation Control, Ancillary Services.

## 1. Introduction

Power system are steadily growing and have become large and more complex with interconnections to neighboring system for reliable and economic operation under dynamic as well as steady state operating condition [1-4]. Deregulation and restructuring of electricity supply industry (ESI) have been taking place in several countries to improve efficiency, lower electricity price, and tackle financial debts. Different structures were adopted in different countries.

To obtain optimal power dispatch under price based environment, electricity and ancillary services could be dispatched successively by the series of linear programming (LP) [5] or simultaneously by the mixed integer linear programming (MILP) [6]. The line flow limits were neglected to simplify the problem. To incorporate line flow limit constraints, an optimal dispatch problem can be formulated as an extended problem in the optimal power flow (OPF) [7-9].

The theoretical analysis presented above is dependent upon the concept of a single slack bus. Recall that the slack bus issue arises primarily because of lack of prior knowledge of system losses. Because of this, to maintain the real power balance on the system one cannot specify the real power generated at all generators. Mathematically, the need for slack bus is seen in the singularity of the load flow real power Jacobian. Therefore, the computed losses on the transmission system are a function of the choice of a slack bus.

In the actual operation of electric power systems there is no single slack bus, instead there are many generators distributed geographically throughout the system which take on the function of a slack bus. To account for this a distributed slack bus must be used. The pricing for losses or imbalances on the system should correspond to actual operation for the pricing scheme to be fair.

Many researchers recognized the inadequacy of a single slack bus and its diverse effects on the steady state calculations in power systems. For example, [10] used a linear transformation to distribute the real power imbalance reflected at the slack bus by self balancing pairs, assuming a lossless system. In [11-13], the approach is based on participation factors, which resembles actual operation of power systems.

In this second part paper, an application of distributed slack bus power flow to competitive electricity supply industry (ESI) is introduced. The participation factors of the generators are obtained by the weighted average of AGC accepted quantities in the ancillary services market. The results shows that the proposed method can satisfactory represent the system behavior that all generators are response to power imbalance. In addition, the proposed method results in the better justified AGC setting in competitive electricity market than that of using single slack bus power flow.

The organization of this paper is as follows. Section 2 addresses the concept of AGC operation as ancillary services under competitive environment. DSPF application to competitive ESI is illustrated in Section 3. Numerical results on the IEEE 30 bus test system are demonstrated in Section 4. Lastly, the conclusion is given.

## 2. AGC as Ancillary Service

In competitive electricity and ancillary services markets, the independent system operator (ISO) must match supply and demand in an optimal and secure manner under the generator operational and transmission system constraints in real time. For reliability and security reasons, ISO purchases ancillary services such as automatic generation control (AGC), spinning and non-spinning reserves from the ancillary services providers or GenCos either on mandatory or competitive basis.

The AGC is the ability of (capacity provided by) the generating unit to respond to signals from the ISO to provide control area balancing, frequency bias and time error correction. Therefore, it is a secondary frequency regulation. Generally, the operating practice requires the AGC to drive the area control error (ACE) to "cross zero" every specified time interval [6]. More specifically, AGC is the regulating capability that responds in an effort to continuously balance in minute to minute load variations [6-7]. Regulating capacity is

PW34

converted to an AGC commodity which is a weighted average of the MW response available in ten minutes [7]. However, each generator can choose to offer any quantities and associated prices for electricity, AGC, Ten-minute spinning reserve (TMSR) and Thirty-minute operating reserve (TMOR), given generator capability [7].

The TMSR is a resource capacity synchronized to the system which is capable to immediately supply energy or reduce demand and fully available within ten minute [6-7]. TMSR is required to respond to contingencies including generator or transmission line outages, not minute to minute load variations like AGC.

The TMOR is the capability of the generator to respond in 30 minutes. TMOR can be referred to the resource from non-synchronizing generator only as suggested [7]. But TMOR could be extended to include either off-line generating unit that can start and ramp up to the specified level of output or synchronized generating unit which can increase the output between 10 and 30 minutes [6].

## 3. DSPF Application to Competitive ESI

### 3.1 Optimal Power Dispatch Based on Offered Prices and Quantities

The objective functions for optimal power dispatch in electricity market can be expressed as [8-9],

$$\text{Minimize } S = \sum_{i=1}^{NG}\left[\begin{array}{l}\sum_{j=1}^{NS_i} S_{ij}P_{Gij} + OAGC_i \cdot AGC_i + \\ OTMSR_i \cdot TMSR_i + OTMOR_i \cdot TMOR_i\end{array}\right], \quad (1)$$

subject to the power balance constraints,

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_{ij}),\ i = 1,\ldots,NB, \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = -\sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_{ij}),\ i = 1,\ldots,NB, \quad (3)$$

where,

$$P_{Gi} = \sum_{j=1}^{NS_i} P_{Gij},\ \text{for } i = 1, \ldots, NG, \quad (4)$$

$$0 \le P_{Gij} \le P_{Gij}^{\max},\ \text{for } j = 1, \ldots, NS_i, \quad (5)$$

and the line flow limit constraints,

$$|f_l| \le f_l^{\max},\ \text{for } l=1, \ldots, NC, \quad (6)$$

and the security constraints,

$$AGCR = \%AGC \cdot (\sum_{i=1}^{NTD} P_{Di} + P_{loss}) \le \sum_{i=1}^{NG} AGC_i, \quad (7)$$

$$TMSRR = \%TMSR \cdot (\sum_{i=1}^{NTD} P_{Di} + P_{loss}) \le \sum_{i=1}^{NG} TMSR_i, \quad (8)$$

$$TMORR = \%TMOR \cdot (\sum_{i=1}^{NTD} P_{Di} + P_{loss}) \le \sum_{i=1}^{NG} TMOR_i, \quad (9)$$

and the generator maximum operating limit constraints,

$$\left[\begin{array}{l}P_{Gi} + AGC_i + \\ TMSR_i + TMOR_i\end{array}\right] \le P_{Gi}^{\max},\ \text{for } i = 1, \ldots, NG. \quad (10)$$

and the generator minimum operating limit and AGC low regulating limit constraints,

$$\left(A_i \cdot (P_{AGC,i}^{low} - P_{Gi}^{\min}) + Z_i \cdot P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}\right) \le 0,$$

$$\text{for } i=1,\ldots,NG, \quad (11)$$

where, $P_{AGC,i}^{low} \ge P_{Gi}^{\min}$, for $i = 1, \ldots, NG$,

and the AGC limit and high regulating limit constraints,

$$0 \le AGC_i \le AGC_i^{\max} \cdot A_i,\ \text{for } i = 1, \ldots, NG, \quad (12)$$

$$P_{Gi} + AGC_i \le P_{AGC,i}^{high},\ \text{for } i=1, \ldots, NG, \quad (13)$$

where, $P_{AGC,i}^{high} \le P_{Gi}^{\max}$, for $i = 1, \ldots, NG$,

and the AGC supply constraints,

$$A_i - Z_i \le 0, \quad \text{for } i = 1, \ldots, NG, \quad (14)$$

where, $A_i \in \{0,1\}$ and $Z_i \in \{0,1\}$, for $i = 1, \ldots, NG$,

and the TMSR limit constraints,

$$0 \le TMSR_i \le TMSR_i^{\max} \cdot Z_i,\ \text{for } i=1,\ldots,NG, \quad (15)$$

and the TMOR limit constraints,

$$0 \le TMOR_i \le TMOR_i^{\max}, \quad \text{for } i = 1, \ldots, NG, \quad (16)$$

where,

- $AGC_i$ is accepted AGC quantity supplied by generator at bus $i$ (MW),
- $AGCR$ is total system AGC requirement (MW),
- $AGC_i^{\max}$ is offer AGC quantity of generator at bus $i$ (MW),
- $A_i$ is on or off AGC status of the generator at bus $i$,
- $f_l$ is MVA flow of line or transformer $l$ (MVA),
- $f_l^{\max}$ is MVA flow limit of line or transformer $l$ (MVA),
- $NB$ is total number of buses,
- $NC$ is total number of line flow and transformer loading terminal constraints,
- $NG$ is total number of buses connected to generators,
- $NS_i$ is number of segments of generator supply cost function at bus $i$,
- $OAGC_i$ is AGC offer price of generator at bus $i$ ($/MWh),
- $OTMSR_i$ is TMSR offer price of generator at bus $i$ ($/MWh),
- $OTMOR_i$ is TMOR offer price of generator at bus $i$ ($/MWh),
- $P_{AGC,i}^{high}$ is high regulating limit of generator at bus $i$ (MW),
- $P_{AGC,i}^{low}$ is low regulating limit of generator at bus $i$ (MW),
- $P_{Gij}^{\max}$ is generator offer block $j$ at bus $i$ (MW)
- $P_{Gi}^{\max}$ is maximum real power generation at bus $i$ (MW),
- $P_{Gi}^{\min}$ is minimum real power generation at bus $i$ (MW),

$P_{Di}$ is total real power demand at bus $i$ (MW),

$P_{Gi}$ is real power generation at bus $i$ (MW),

$P_{Gij}$ is accepted generator offer block $j$ at bus $i$ (MW),

$P_{loss}$ is total system real power loss (MW),

$Q_{Gi}$ is reactive power voltage controlled generation at bus $i$ (MVAR),

$Q_{Di}$ is reactive power demand at bus $i$ (MVAR),

$S_{ij}$ is offer price block $j$ of generator at bus $i$ ($/MWh),

$TMOR_i$ is accepted quantity of TMOR supplied by generator at bus $i$ (MW),

$TMSR_i$ is accepted quantity of TMSR supplied by generator at bus $i$ (MW),

$TMORR$ is total system TMOR requirement (MW),

$TMSRR$ is total system TMSR requirement (MW),

$|y_{ij}|$ is magnitude of the $y_{ij}$ element of $Y_{bus}$ (mho),

$Z_i$ is committed or uncommitted status of generator at bus $i$,

$\theta_{ij}$ is angle of the $y_{ij}$ element of $Y_{bus}$ (radian), and

$\delta_{ij}$ is voltage angle difference between bus $i$ and $j$ (radian).

$\%AGC$ is AGC requirement in percentage of total real power dispatch,

$\%TMOR$ is TMOR requirement in percentage of total real power dispatch, and

$\%TMSR$ is TMSR requirement in percentage of total real power dispatch,

By Equations (12) and (14), the AGC offer of generator $i$ can be selected ($A_i = 1$) only when the generator $i$ is committed to the system ($Z_i = 1$). Under the AGC low and high regulating limits, the generator can perform AGC function. The AGC low regulating limit is higher than or equal to the minimum operating limit and AGC high regulating limit is less than or equal to the maximum operating limit. In this paper, the mixed-integer linear programming (MILP) is used to solve the problem formulation in Eqs.(1)-(16).

### 3.2 Electricity Balancing Using AGC Secondary Control

The imbalances between contractual and physical electricity consumption in real time are handled by a balancing mechanism in balancing market (BM) [9]. Therefore, there is an opportunity for generators to sell their remaining available capability in BM. However, the ISO is required to simultaneously optimally dispatch the electricity and ancillary services markets. The DSPF introduced in Part I is used for balancing electricity. The participation factors are obtained by,

$$\alpha_i = \frac{AGC_i}{\sum_{j \in IG} AGC_i}, \quad (17)$$

where,

$\alpha_i$ is participation factor of generator connected to bus $i$,

$OEAGC_i$ is the offered energy price of $AGC_i$ ($/MWhr).

If the violated line sensitivity of the generator $i$ is greater than zero ($\frac{df_i}{dP_{Gi}} > 0$), the $AGC_i$ is set to zero. With this formulation, the AGC is distributed to all generators connected to the system in accordance with their offered price.

### 4. Numerical Results

The proposed method has been tested with modified IEEE 30 bus system. It network diagram is shown in Part I paper. The network data was given in [14]. The offered price and quantities of electricity are given in [15]. The AGC, TMSR, and TMOR offered prices and quantities are shown in Table 1. The AGC, TMSR, and TMOR requirements are 3%, 5%, and 5%, of total demand, respectively.

The dispatch result is shown in Table 2. The line 9-11 flow is violate its limit and resulted in binding solution on the line 9-11 flow limit constraint.

Table 1 AGC, TMSR, and TMOR offered prices and quantities of IEEE 30 bus system

| Gen | AGC | | TMSR | | TMOR | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bus | MW | $/MW | MW | $/MW | MW | $/MW |
| 1 | 2 | 7 | 4 | 8 | 3 | 15 |
| 2 | 4 | 11 | 2 | 11 | 4 | 13 |
| 5 | 2 | 12 | 5 | 8 | 3 | 14 |
| 8 | 3 | 13 | 2 | 10 | 2 | 15 |
| 11 | 3 | 14 | 5 | 14 | 5 | 16 |
| 13 | 2 | 5 | 2 | 12 | 3 | 12 |

Table 2 Dispatch results of IEEE 30 bus system

| Gen Bus | Electricity | AGC | TMSR | TMOR |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 70.65 | 2 | 4 | 3 |
| 2 | 20.00 | 4 | 2 | 4 |
| 5 | 82.50 | 0.5872 | 5 | 2.312 |
| 8 | 41.20 | 0 | 2 | 2 |
| 11 | 29.46 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 42.43 | 2 | 1.312 | 3 |

It is presumed that the load is increased by 1%, distributed to all bus, proportionately to initial loads, during the time interval of AGC secondary control action. The total load is 286.23 MW. The power flow program with single and distributed slack bus are run to obtain final conditions after AGC take action. Table 3 shows the power flow result of single slack bus power flow. With single slack bus, the power imbalance is met by the generator at bus 1. The total real power generation is 289.18 MW and the total real power loss is 2.95 MW.

.

Table 4 shows the power flow result of DSPF. The DSPF results in the total real power generation of 289.15 MW with total real power loss of 2.92 MW.

Table 3 Power flow result of single slack bus power flow

| Gen Bus | Power Generation at Initial Point (MW) | Power Generation after Power Flow (MW) |
|---|---|---|
| 1 | 70.65 | 73.59 |
| 2 | 20.00 | 20.00 |
| 5 | 82.50 | 82.50 |
| 8 | 41.20 | 41.20 |
| 11 | 29.46 | 29.46 |
| 13 | 42.43 | 42.43 |

Table 4 Power flow result of DSPF

| Gen Bus | Power Generation at Initial Point (MW) | Power Generation after Power Flow (MW) |
|---|---|---|
| 1 | 70.65 | 71.33 |
| 2 | 20.00 | 21.35 |
| 5 | 82.50 | 82.70 |
| 8 | 41.20 | 41.20 |
| 11 | 29.46 | 29.46 |
| 13 | 42.43 | 43.11 |

The results in Table 4 show that the proposed method can allocate the AGC dispatch to the generator corresponding to their accepted AGC in ancillary services market. The DSPF can be potentially applied to the competitive electricity market.

## 5. Conclusions

In this paper the DSPF is satisfactory represent the system behavior that all generators are response to power imbalance. In addition, the proposed method results in the well justified for AGC in competitive electricity market.

## References


[1] J. A. Momoh, L. G. Dias, S,X, Guo and R. Adapa, "Economic Operation and Planning of Multi-Area Interconnected Power Systems", IEEE Transaction on Power System, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 1044-1053.

[2] R. W. Ferrero and S. M. Shahideshpour, "Dynamic Economic Dispatch in Deregulated Systems", Electric Power & Energy Systems, Vol. 19, 1997, pp. 433-439.

[3] R. W. Ferrero and S. M. Shahideshpour, "Optimality Condition in Power Transaction in Deregulated Power Pool", Electric Power Systems Research, Vol. 42, 1997, pp. 209-214.

[4] R. W. Ferrero, S. M. Shahideshpour and V. C. Ramesh, "Transaction Analysis in Deregulated Power System Using Game Theory", IEEE Transaction on Power System, Vol. 12, No. 3, August 1997, pp. 1340-134.

[5] F. D. Galiana and M. Illic, "A Mathematical Framework for the Analysis and Management of Power Transactions under Open Access", IEEE Transaction on Power System, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 681-687.

[6] N. S. Rau, "Optimal dispatch of a system based on offers and bids-A mixed integer LP formulation", IEEE Trans. on Power Syst., vol. 14, no. 1, pp. 274-279, 1999.

[7] K. W. Cheung, P. Shamsollahi, D. Sun, J. Milligan, and M. Potishnak, "Energy and Ancillary Service Dispatch for the Interim ISO New England Electricity Market", IEEE Trans. on Power Syst., vol. 15, no. 3, pp. 968-974, 2000.

[8] K. Chayakulkheeree and W. Ongsakul, "Fuzzy Constrained Optimal Power Dispatch for Competitive Electricity and Ancillary Services Markets", Electric Power Component and Systems Journal, vol. 33, no. 4, pp. 389-410, Apr. 2005.

[9] W. Ongsakul and K. Chayakulkheeree, "Coordinated Fuzzy Constrained Optimal Power Dispatch for Bilateral Contract, Balancing Electricity and Ancillary Services Markets", IEEE Transaction on Power System, vol. 21, no. 2, pp. 593-604, May, 2006.

[10] J. Zaborszky, G. Huang, S. Y. Lin, "Reactive and Real Power Control For Computationally Effective Voltage and Thermal Management,'' IEEE/PES Summer Meeting Seattle, Washington, 1984, paper no. 84 SM 618-5.

[11] L. S. Luen, "The Load Flow Problem without Slack Bus", McGill University, Masters Thesis 1979, Montreal, Canada.

[12] D. Thukaram, K. Parthasarathy, H. P. Khincha and B. S. Ramakrishna Iyengar, "Steady State Power Flow Analysis Considering Load and Generation Regulation Characteristic, " The Journal of the Institution of Engineering (I), Vol. 64, pt. EL 5, April 1984, pp. 274-279.

[13] A. Zobian and M. D. Ilic, "Unbundling of Transmission and Ancillary Services Part Iis Technical Issues", IEEE Transs on Power Syst., Vol. 12, No. 2, pp. 539-548, 1997.

[14] O. Alsac and B. Stott, "Optimal Load Flow with Steady State Security", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS93, No. 3, 1974, pp. 745-751.

[15] W. Ongsakul and K. Chayakulkheeree, "Constrained Optimal Power Dispatch for Electricity and Ancillary Services Auctions", Electric Power Systems Research, vol. 66, no. 3, pp. 193-204, Sep. 2003.