มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีข้อจำกัดฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น

NON-LINEAR FUZZY NETWORK CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW

กีรติ ชยะกุลคีรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีการศึกษา 2547

งานเอกสารและสิ่งพิมพ์
สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานการวิจัย
เรื่อง

การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีข้อจำกัดฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น

NON-LINEAR FUZZY NETWORK CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW

กีรติ ชยะกุลคีรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2547

คำนำ

รายงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการสนับสนุนให้บุคลากรภายในมหาวิทยาลัยศรีปทุมได้มีโอกาสผลิตผลงานวิจัยที่มีคุณภาพและเผยแพร่ออกสู่ภายนอก โดยให้อาจารย์เสนอโครงการที่สำนักวิจัยซึ่งมีทั้งการวิจัยวิชาการและการวิจัยสถาบัน ทั้งนี้เพื่อให้คณาจารย์ได้พัฒนาความรู้และประสบการณ์ทางวิชาการอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการขอรับทุนอุดหนุนงานวิจัยจากหน่วยงานภายนอกและนำไปสู่การขยายกรอบความร่วมมือทางวิชาการกับหน่วยงานภายนอกต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยวิชาการเพื่อพัฒนากระบวนการคำนวณ เพื่อหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งในที่นี้คือการหาคำตอบในการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังให้มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิชาการในด้านระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป และหากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย และยินดีน้อมรับคำแนะนำ เพื่อปรับปรุงแก้ไขต่อไป

นายกีรติ ชยะกุลคีรี
ผู้วิจัย
ตุลาคม 2548

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณทั้งหมดและได้ให้เวลาในการทำโครงการวิจัยนี้ รวมทั้งขอขอบคุณสำนักวิจัยที่ได้อำนวยความสะดวกและประสานงานอย่างดีเยี่ยมในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วีรกร อ่องสกุล ผู้ทรงคุณวุฒิที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงตลอดการดำเนินงานและการเขียนรายงานวิจัยนี้

Acknowledgements

The author highly acknowledges Sripatum University for fully support of this research. Thanks are also expressed to his colleagues in the Bureau of Research for their kind and crucial co-operations. The author also wishes to express his profound and sincere thanks to Associate Professor Dr. Weerakorn Ongsakul, advisor of the research, for his valuable guidance and timely suggestions throughout the process of the research.

หัวข้อวิจัย : การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีข้อจำกัดฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น

ผู้วิจัย : นายกีรติ ชยะกุลดีรี

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการคำนวณหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Optimal Power Flow) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการหาคำตอบในที่นี้คือการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าและการปรับแท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำสุด โดยพิจารณาให้ข้อจำกัดของพิกัดกำลังของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่บัส และอัตราการเพิ่มและลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิจัยได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของ OPF ที่มีข้อจำกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และขนาดแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดของบัส อัตราการเพิ่มหรือลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยได้แยกปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต (Total fuel cost fuzzy minimization subproblem) และ ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย (Real power loss fuzzy minimization subproblem) และได้ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการคำนวณกับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 30 บัส และ 118 บัส ของ IEEE

จากผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอพบว่ากระบวนการหาคำตอบ FCOPF ที่เสนอสามารถหาคำตอบที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดโดยมีข้อจำกัดพิกัดกำลังของระบบส่งไฟฟ้า และข้อจำกัดอัตราการเพิ่มและลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบฟัซซี่ในปัญหา ออกเป็นปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต และสามารถหาคำตอบที่มีกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียโดยมีข้อจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นแบบฟัซซี่ในปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้โปรแกรมฟัซซี่เชิงเส้น ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ได้คำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการหาคำตอบ OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่

คำสำคัญ : การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
โปรแกรมฟัซซี่ เชิงเส้นข้อจำกัดแบบฟัซซี่

Research Title : Non-Linear Fuzzy Network Constrained Optimal Power Flow

Name of Researcher : Mr. Keerati Chayakulkheeree

Name of Institute : Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University

Year of Publication : B.E. 2548

ABSTRACT

This report proposes a non-linear fuzzy network constrained optimal power flow algorithm considering non-linear fuzzy line flow and transformer loading limits, generator ramp rate and bus voltage magnitude constraints. The problem is decomposed into total fuel cost fuzzy minimization subproblem and total real power loss fuzzy minimization subproblem, which are solved by fuzzy linear programming (FLP). In the total fuel cost fuzzy minimization subproblem, the line flow and transformer loading limits constraints and the generator ramp rate constraints are treated as fuzzy constraints. Meanwhile, in the total real power loss fuzzy minimization subproblem, the bus voltage magnitude limits are treated as fuzzy constraints. The proposed FCOPF algorithm is tested on the modified IEEE 30 bus system and 118 bus systems.

Test results indicate that the fuzzy constrained optimal power flow algorithm could efficiently trade off among total fuel cost, line flow and transformer loading and generator ramp-rate in the total fuel cost fuzzy minimization subproblem and between total real power loss and bus voltage magnitude in the total real power loss fuzzy minimization subproblem, leading to the lower total fuel cost.

Keywords : Optimal Power Flow, Fuzzy Linear Programming, Fuzzy Constraint

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 คำถามการวิจัย	2
	1.4 สมมุติฐานการวิจัย	2
	1.5 ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.6 นิยามศัพท์	3
2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
	2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย	4
	2.2 ทฤษฎีที่รองรับเรื่องที่วิจัย	5
	2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
	2.4 สรุป	7
3	ระเบียบวิธีวิจัย	8
	3.1 รูปแบบการวิจัย	8
	3.1.1 ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต (Total fuel cost fuzzy minimization subproblem)	9
	3.1.2 ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย (Real power loss fuzzy minimization subproblem)	11
	3.2 กระบวนการของ FCOPF	12
	3.2.1 การวางหลักวิธีของโปรแกรมเชิงเส้นฟัซซี่ (Fuzzy Linear Programming, FLP) สำหรับปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต	12
	3.2.2 การวางหลักวิธีของโปรแกรมเชิงเส้นฟัซซี่สำหรับปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย	16
	3.2.3 กระบวนการคำนวณ	18

บทที่ **หน้า**

4 การทดสอบวิธีการ 20

4.1 การทดสอบกระบวนการ FCOPF กับระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส 20

4.1.1 กรณีศึกษาภายในสภาวะการทำงานปกติของระบบ (base case) 22

4.1.2 กรณีที่มีสายส่งไฟฟ้าผิดพร่อง (line outage case) 23

4.2 การทดสอบกระบวนการ FCOPF กับระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส 25

5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 27

บรรณานุกรม 28

ภาคผนวก 31

ภาคผนวก ก. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส 32

ภาคผนวก ข. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส 35

- Network data

- Power Flow Results

ประวัติย่อผู้วิจัย 51

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

4.1 ฟังก์ชั่นค่าใช้จ่ายในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและขอบเขตการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 21
4.2 ผลลัพธ์ของกรณีศึกษาภายในสภาวะการทำงานปกติของระบบ 23
4.3 ผลลัพธ์ของกรณีที่สายส่งไฟฟ้าระหว่างบัส 2-4 และบัส 2-5 หลุดออกจากระบบ 24

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ **หน้า**

3.1 ค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ได้ทำให้เป็นเชิงเส้น 11

3.2 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของค่าเชื้อเพลิงรวมในการผลิต 14

3.3 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด ที่ไหลได้ในสายส่งและในหม้อแปลงไฟฟ้า 14

3.4 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของอัตราการเพิ่ม และลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 15

3.5 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของกำลังงานจริงสูญเสียทั้งหมดในระบบ 17

3.6 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 17

3.7 กระบวนการคำนวณการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้า ที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีข้อจำกัดฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น 19

4.1 แผนภาพเส้นเดียว (one-line diagram) ของระบบมาตรฐาน IEEE 30 บัส 21

4.2 ต้นทุนในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการทำให้เป็นเชิงเส้น 22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิธีการหาคำตอบของปัญหาการควบคุมการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Optimal power flow, OPF) ได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องโดยใช้วิธีการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงการพิจารณาข้อจำกัดของระบบที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ในการทำงาน และในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ ใช้งาน OPF ในการบริหารจัดการระบบไฟฟ้าจริงได้แล้วในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามวิธีการหาคำตอบของ OPF ยังคงต้องการการพัฒนาอีกมาก

การแก้ปัญหา OPF มีพื้นฐานอยู่บนวิธีการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุด (Optimization Techniques) ของสมการวัตถุประสงค์ (Objective Functions) โดยเป็นไปตามข้อจำกัด (Constraints) ของระบบ วิธีการหาคำตอบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming), โปรแกรมควอทคราติก (Quadratic Programming), วิธีการนิวตัน (Newton's Method) และคอนจูเกตเกรเดียน (Conjugate Gradient) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป

ทั้งนี้ การวิเคราะห์ OPF ด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น ยังคงมีข้อจำกัดในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือการวิเคราะห์โดยถือว่าข้อจำกัดต่าง ๆ ในระบบเป็นข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ (Crisp constraints) ที่ไม่สามารถยืดหยุ่นได้ อาจทำให้การแก้ปัญหา OPF ได้คำตอบที่ระมัดระวังจนเกินไป ซึ่งในทางปฏิบัติจริงนั้นการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวัตถุประสงค์และข้อจำกัดของระบบจะให้คำตอบของ OPF ที่ดีกว่า เนื่องจากข้อจำกัดของระบบในความเป็นจริงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ข้อจะจำกัดทางกายภาพจริงของระบบซึ่งไม่สามารถยืดหยุ่นได้ เช่น การปรับตั้งแทป (Tap) ของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น และข้อจำกัดทางด้านความปลอดภัยซึ่งสามารถยืดหยุ่นได้ในบางครั้ง เช่น กำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และขนาดแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดของบัส (Bus Voltage Magnitude) เป็นต้น ซึ่งการพิจารณาให้ข้อจำกัดของระบบใน OPF ให้สามารถยืดหยุ่นได้นั้นสามารถทำได้โดยการพิจารณาให้เป็นข้อจำกัดแบบฟัซซี่ (Fuzzy Constraints) ทั้งนี้ การพัฒนาวิธีการหาคำตอบของปัญหา OPF ให้สามารถวิเคราะห์ ข้อจำกัดแบบฟัซซี่ ยังไม่มีการทำอย่างจริงจัง แม้ว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม-บริหารจัดการระบบไฟฟ้าและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความซับซ้อนในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ

- เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของ OPF ที่มีข้อจำกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และขนาดแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดของบัสแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น
- เพื่อทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหา OPF ให้สามารถวิเคราะห์ข้อจำกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และขนาดแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดของบัสแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น

1.3 คำถามการวิจัย

แบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับปัญหา OPF ที่มีข้อจำกัดแบบฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น ในระบบไฟฟ้ากำลัง จะมีข้อดีและข้อจำกัดอะไรบ้างเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีข้อจำกัดแบบฟัซซี่แบบเป็นเชิงเส้น และแบบกรอบคงที่

1.4 สมมุติฐานการวิจัย

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เสนอในงานวิจัยจะสามารถใช้หาคำตอบของ OPF ในระบบไฟฟ้า ได้โดยมีข้อจำกัดของระบบแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบของปัญหา OPF ดีกว่าการคำนวณที่ใช้ข้อจำกัดฟัซซี่แบบเป็นเชิงเส้นและแบบกรอบคงที่ เนื่องจากสามารถสะท้อนคุณลักษณะของข้อจำกัดในระบบได้ใกล้เคียงความเป็นจริงและมีความยืดหยุ่นมากกว่า

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับตอบปัญหา OPF ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีข้อจำกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดในสายส่งไฟฟ้า และขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส เป็นข้อจำกัดแบบฟัซซี่ การวิเคราะห์จะเป็นการวิเคราะห์แยกระหว่างกำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟ้า วิธีการหาคำตอบที่จะนำมาพิจารณาในการศึกษาคือโปรแกรมฟัซซี่เชิงเส้น (Fuzzy Linear Programming, FLP) การทดสอบกระทำโดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณวิธีการที่เสนอ ระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำมาใช้คือ ระบบทดสอบที่ใช้คือระบบมาตรฐาน 30 บัส และ 118 บัสของ IEEE โดยจะเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของวิธีที่เสนอในงานวิจัยกับวิธีการอื่น ๆ ในงานวิจัยที่มีอยู่แล้ว

1.6 นิยามศัพท์

Optimal Power Flow (OPF)	การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
Economic Dispatch (ED)	การสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด
Fuzzy Linear Programming (FLP)	โปรแกรมเชิงเส้นฟัซซี่
Objective Function	ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์
Crisp Constraint	ข้อจำกัดแบบกรอบคงที่
Fuzzy Constraint	ข้อจำกัดแบบฟัซซี่

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย

การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Optimal Power Flow, OPF) ได้มีการพัฒนามาเป็นเวลานาน โดยผู้เริ่มเสนอคือ Carpentier ในปี ค.ศ. 1962 ในปัจจุบัน OPF ได้รับการพัฒนาจนถึงขั้นที่สามารถใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังจริงได้ การพัฒนาด้าน OPF ในปัจจุบันจะให้ความสนใจกันที่ ความสามารถของกระบวนการคำนวณ (algorithm) ในการแก้ปัญหาโดยพิจารณาถึงความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง (security) ในการหาคำตอบด้วย

OPF แตกต่างจากการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด (Economic Dispatch, ED) เนื่องจากการพิจารณาปัญหาแบบ ED จะมีข้อจำกัดที่เป็นสมการของระบบเพียงหนึ่งข้อจำกัด (นอกเหนือจากข้อจำกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง) คือสมการสมดุลของกำลังงานไฟฟ้าจริง (real power balance) นั่นคือ ผลรวมของกำลังงานไฟฟ้าจริงที่ผลิตทั้งหมดเท่ากับผลรวมของกำลังงานไฟฟ้าจริงภาระบวกกับกำลังงานไฟฟ้าจริงที่สูญเสียของระบบ ดังนั้นปัญหา ED สามารถเขียนได้เป็น

Minimize $$TF = \sum_{i \in BG} F(P_{Gi})$$

Subjected to $$\sum_{i \in BG} P_{Gi} = P_{load} + P_{loss}$$

โดยที่

TF เป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าทั้งหมด (บาทต่อชั่วโมง)

$F(P_{Gi})$ เป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังงานไฟฟ้า P_{Gi} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (บาทต่อชั่วโมง)

BG เป็นเซตของบัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{Gi} เป็นกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

P_{load} เป็นกำลังงานไฟฟ้าจริงของภาระทั้งหมด (MW)

P_{loss} เป็นกำลังงานไฟฟ้าจริงที่สูญเสียทั้งหมด (MW)

อย่างไรก็ตามการหาคำตอบแบบ ED เป็นการพิจารณาที่อยู่บนพื้นฐานที่ระบบมีค่ากำลังงานสูญเสียเท่ากันไม่ว่าจะสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าแบบใด ซึ่งในความเป็นจริงกำลังงานสูญเสียในระบบจะแตกต่างกัน เมื่อสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่สภาวะแตกต่างกัน

ดังนั้นเมื่อเรานำเอาสมการการไหลของกำลังงานไฟฟ้า (Power flow equations) เข้ากับปัญหา ED จะทำให้ได้คำตอบที่ตรงกับความเป็นจริงมากขึ้น เนื่องจากได้ค่ากำลังงานไฟฟ้าสูญเสียจริงของระบบ และเป็นการยืนยันคำตอบที่ได้ว่าสามารถใช้ได้จริง การพิจารณาสมการการไหลของกำลังงานไฟฟ้า (Power flow equations) พร้อมกันกับปัญหา ED เรียกว่า OPF โดยในกรณีนี้เป็น OPF ที่หาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดต้นทุนในการผลิตต่ำสุด

เมื่อเราพิจารณาสมาการการไหลของกำลังงานไฟฟ้าในระบบ จะทำให้สามารถหาค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้าย่อยหรือที่บัส (Bus) และค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าได้ ซึ่งทำให้การหาคำตอบ OPF สามารถรวมเอาข้อจำกัดขนาดของแรงดันที่บัส และกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่สายส่งไฟฟ้าเข้าไปในปัญหาได้ โดยสามารถเขียนอสมการแสดงข้อจำกัดได้เป็น

$$|V_i|^{\min} \le |V_i| \le |V_i|^{\max}, i = 1,..., NB$$

$$|f_i| \le |f_i|^{\max}, i = 1,..., NL$$

โดยที่

$|V_i|^{\min}$ เป็นขอบเขตของขนาดของแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส i (V)

$|V_i|$ เป็นขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (V)

$|V_i|^{\max}$ เป็นขอบเขตของขนาดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่บัส i (V)

NB เป็นจำนวนบัสทั้งหมด

$|f_i|$ เป็นขนาดของกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลง i (MVA)

$|f_i|^{\max}$ เป็นขอบเขตสูงสุดของขนาดของกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลง i (MVA)

NL เป็นจำนวนสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมด

นอกจากนี้ การหาคำตอบ OPF ยังสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบที่สามารถควบคุมได้ (Control variables) นอกเหนือจาก P_{Gi} ได้เช่น แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Terminal Voltage), แท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Tap Setting) เป็นต้น

2.2 ทฤษฎีที่รองรับเรื่องที่วิจัย

ปัญหา OPF เป็นการสร้างสมการคณิตศาสตร์ขนาดใหญ่ และซับซ้อน ซึ่งต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยคำนวณ ทั้งนี้ ได้มีการวิจัยและพัฒนากระบวนการคำนวณและโปรแกรมคอมพิวเตอร์กันมาอย่างต่อเนื่อง หลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีมีข้อดี – ข้อเสีย แตกต่างกันไป เช่น

- วิธี Lambda Iteration: วิธีการนี้สามารถพิจารณากำลังงานไฟฟ้าจริงที่สูญเสียได้ในรูปของเมตริกซ์ที่เรียกว่า B-matrix หรือใช้ตัวประกอบชดเชย (Penalty Factor) วิธีการนี้ได้รับการใช้งานแพร่หลายในโปรแกรม ED มาตรฐาน
- วิธี Gradient: วิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณมากและการแก้ปัญหาที่มีข้อจำกัดเป็นอสมการ (Inequality Constraint) ทำได้ไม่สะดวก
- วิธีการ Newton: วิธีการนี้ให้คำตอบที่เร็วแต่ก็ยังมีความยากลำบากในการพิจารณาปัญหาที่มีข้อจำกัดเป็นอสมการเช่นกัน
- วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP): วิธีการ LP สามารถใช้กับปัญหาที่มีข้อจำกัดเป็นอสมการได้ดี ทำให้ได้รับการใช้งานแพร่หลาย โดยการพิจารณาปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะนิยมใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ก่อน
- วิธีการ Quadratic Programming (QP): วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถใช้กับปัญหาที่มีสมการวัตถุประสงค์เป็นสมการตัวแปรยกกำลังสอง และรองรับปัญหาที่มีข้อจำกัดที่เป็นอสมการเชิงเส้นได้
- วิธีการ Interior Point (IP): วิธีนี้เป็นอีกวิหนึ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถรองรับปัญหาที่มีข้อจำกัดที่เป็นอสมการได้ดี และใช้เวลาในการคำนวณต่ำ

2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 วิธีการหาคำตอบของปัญหา OPF ได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง และได้มีการนำเอาวิธีการหาคำตอบในแบบต่าง ๆ เช่น โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) โปรแกรมควอดราติก (Quadratic Programming) คอนจูเกตเกรเดียนต์ (Conjugate Gradient) วิธีการนิวตัน (Newton Method) กระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม(Genetic Algorithm, GA) (Bakirtzis et al 2002; Walters and Sheble, 1993; Damousis et al 2003; Chen and Chang, 1995), โปรแกรมวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming, EP) (Lin et al, 2001; Attaviriyanupap et al, 2002; Yang et al, 1996; Yuryevich and Wong ,1999) , การค้นหาแบบทาบู (Tabu Search, TS) (Lin et al, 2002; Lin et al 2001)

ในการหาคำตอบของปัญหา OPF การวิเคราะห์โดยถือว่าข้อจำกัดบางอย่างในระบบเป็นข้อจำกัดที่สามารถยืดหยุ่นได้ นั้นสามารถทำได้โดยพิจารณาให้ข้อจำกัดดังกล่าวเป็นข้อจำกัดแบบฟัซซี่ (Fuzzy constraints) การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถหาคำตอบของ OPF ในแบบที่ใกล้เคียงกับการปฏิบัติจริงซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ และ

ข้อจำกัด Guan et al (1995) ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบฟัซซี่ในการพิจารณาข้อจำกัดของกำลังงานสูงสุดของสายส่งไฟฟ้า ในการหาคำตอบของ OPF. Edwin Liu and Guan (1996) ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบฟัซซี่ในการพิจารณาข้อจำกัดของกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของสายส่งไฟฟ้า และการควบคุมอุปกรณ์ ในการหาคำตอบของ OPF อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงผลของการไหลของกำลังงานเสมือน

สำหรับการหาคำตอบของการควบคุมกำลังงานเสมือน ที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Reactive Power Optimization) นั้น โดยมากจะเป็นการหาคำตอบที่ทำให้ระบบมีค่าความสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าจริงน้อยที่สุด (Real Power Loss Minimization) ซึ่งได้มีการเสนอใช้วิธีการวิเคราะห์แบบฟัซซี่สำหรับข้อจำกัดขนาดของแรงดันไฟฟ้า โดย Tomsovic (1992) และ Abdul-Rahman, Shahidehpour (1993) อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งสองไม่ได้คำนึงถึงผลของกำลังงานไฟฟ้าจริงในระบบ

นอกจากนี้วิธีการหาคำตอบของ OPF แบบมีข้อจำกัดแบบฟัซซี่ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นเป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของข้อจำกัดแบบฟัซซี่แบบเชิงเส้น ซึ่งอาจไม่สามารถแสดงคุณลักษณะฟัซซี่ของข้อจำกัดในระบบไฟฟ้าได้ใกล้เคียงความเป็นจริง และยังขาดความยืดหยุ่น

2.4 สรุป

การพัฒนาวิธีการหาคำตอบของปัญหา OPF ให้มีประสิทธิภาพเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินการ และบริหารจัดการระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้ OPF ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องโดยได้มีการนำเอาวิธีการหาคำตอบในแบบต่าง ๆ และยังสามารถพัฒนาวิธีการได้อีกมาก อย่างไรก็ตาม การวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการเน้นการพัฒนากระบวนการคำนวณให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนในด้านการพัฒนาวิธีการให้สามารถพิจารณาความยืดหยุ่นของข้อจำกัด ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการหาคำตอบที่ให้ความสำคัญทั้งวัตถุประสงค์และข้อจำกัดในเชิงชั่งน้ำหนักแบบฟัซซี่นั้น ยังสามารถพัฒนาได้อีกมาก

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

งานวิจัยเป็นการพัฒนา และทดสอบแบบจำลองสำหรับหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีข้อจำกัดฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีแบบแผนทางการวิจัย คือ พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของ OPF ที่มีข้อจำกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และขนาดแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดของบัสแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหา OPF ให้สามารถวิเคราะห์ข้อจำกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และขนาดแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดของบัสแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้รูปแบบของแบบจำลองที่นำเสนอ แบ่งออกเป็นสองปัญหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ย่อย (fuzzy minimization subproblems) โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมฟัซซี่เชิงเส้น (fuzzy linear programming, FLP)

นิยามของตัวแปรในงานวิจัย

ตัวแปรทราบค่า

$F(P_{Gi})$: ต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i (S/h)

BD : เซตของบัสที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้า

BG : เซตของบัสที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$f_l^{\max}$: พิกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า l (MVA)

NB : จำนวนบัสทั้งหมด

NT : จำนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ปรับตั้งแท็ปได้ในระบบ

P_{Di} : ความต้องการกำลังงานไฟฟ้าจริงที่บัส i (MW)

$P_{Gi}^{\max}$: พิกัดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

$P_{Gi}^{\min}$: กำลังงานไฟฟ้าต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

$Q_{Gi}^{\max}$: พิกัดกำลังงานไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

$Q_{Gi}^{\min}$: กำลังงานไฟฟ้าต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

R_{Gi}^{inc} : อัตราการเพิ่มกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW/min)

R_{Gi}^{dec} : อัตราการลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW/min)

S_{ij} : ค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ทำให้เป็นเชิงเส้นส่วนที่ j ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (\$/MWh)

$T_i^{\max}$: การปรับตั้งแท็ปสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า i (MW)

$T_i^{\min}$: การปรับตั้งแท็ปต่ำสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า i (MW)

$|V_i^{\max}|$: ขนาดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (kV)

$|V_i^{\min}|$: ขนาดต่ำสุดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (kV)

$|y_{ij}|$: ขนาดของ y_{ij} ในเมตริก Y_{bus} (mho)

θ_{ij} : มุมของ y_{ij} ในเมตริก Y_{bus} (radian)

ตัวแปรควบคุม

$P_{Gij}^{\max}$: กำลังงานไฟฟ้าจริงส่วนที่ j ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i ที่ได้จากการแปลงฟังก์ชั่นค่าใช้จ่ายในการผลิตให้เป็นเชิงเส้น (MW)

T_i : การปรับตั้งแท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้า i (MW)

$|V_i|$: ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (kV)

ตัวแปรตาม

f_l : กำลังงานไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า l (MVA)

NC : จำนวนสายส่งและหม้อแปลงที่ทำงานเกินพิกัดกำลัง

P_{Gi} : กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

P_i : กำลังงานไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าสู่ระบบที่บัส i (MW)

P_{loss} : กำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียทั้งหมดในระบบ (MW)

Q_{Gi} : กำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าสู่ระบบโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MVAR)

Q_{Di} : ความต้องการกำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่บัส i (MVAR)

δ_{ij} : ผลต่างระหว่างมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i และบัส j (radian)

3.1.1 ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต (Total fuel cost fuzzy minimization subproblem)

ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของ ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของค่าเชื้อเพลิงรวมการผลิต (Total fuel cost fuzzy minimization subproblem) คือ

หาค่าต่ำสุดของ $FC = \sum_{i \in BG} F(P_{Gi})$ (1)

โดยค่าค่าเชื้อเพลิงในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกทำให้เป็นเชิงเส้นหลายส่วนต่อกัน (pieced-wise linear cost function) ซึ่งฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์จะเขียนได้เป็น

หาค่าต่ำสุดของ $FC = \sum_{i \in BG} \sum_{j=1}^{NS_i} S_{ij} P_{Gij}$, (2)

โดยเป็นไปตามข้อจำกัดการสมดุลของกำลังงานไฟฟ้า คือ

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

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = -\sum_{j=1}^{NB} |V_i \| V_j \| y_{ij} | \sin(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i = 1,..., NB, \quad (4)$$

เมื่อ

$$P_{Gi} = \sum_{j=1}^{NS_i} P_{Gij} \text{ , } i = 1,\ldots, NG, \quad (5)$$

$$0 \le P_{Gij} \le P_{Gij}^{\max} \text{ , } j = 1,\ldots, NS_i, \; i = 1,\ldots, NG, \quad (6)$$

และเป็นไปตามข้อจำกัดแบบฟิซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่งและในหม้อแปลงไฟฟ้า

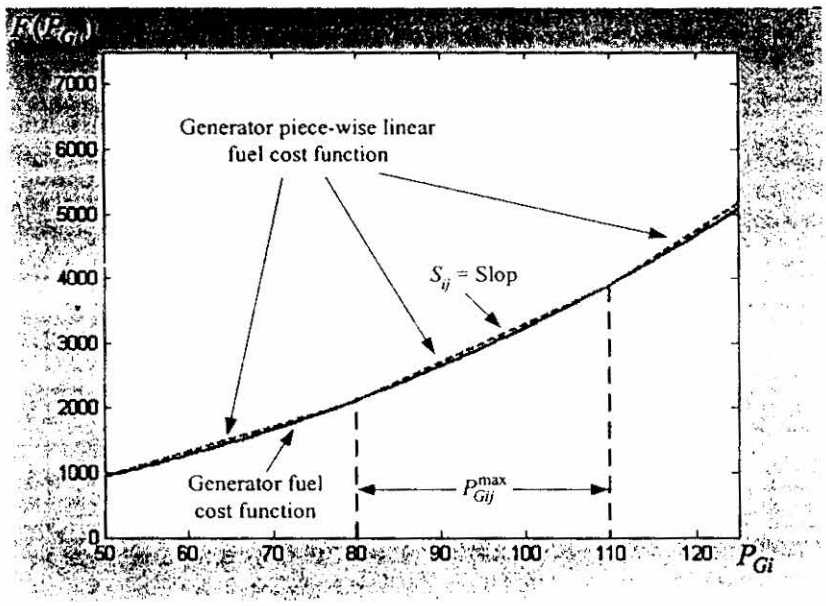
$$|f_l| \tilde{\le} f_l^{\max} \text{ , for } l=1, \ldots, NC, \quad (7)$$

และข้อจำกัดแบบฟิซซี่ของอัตราการเพิ่มและลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{Gi}^o - R_{Gi}^{up} \cdot Min \tilde{\le} P_{Gi} \tilde{\le} P_{Gi}^o - R_{Gi}^{down} \cdot Min \text{ , } i = 1,\ldots, NG, \quad (8)$$

และข้อจำกัดพิกัดกำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้าจริงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max} \text{ , } i = 1,\ldots, NG. \quad (9)$$



ภาพประกอบ 3.1 ค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ได้ทำให้เป็นเชิงเส้น

ในที่นี้ S_{ij} และ P_{Gij} เป็นค่าที่ได้จากการแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i ให้เป็นเชิงเส้น ที่มีทั้งหมด NS_i ส่วนดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 ข้อจำกัดในอสมการที่ 7 สามารถหาได้จากการใช้ตัวประกอบความไว (sensitivity factor) ดังแสดงใน [Wood และ Wollenberg, 1996] ส่วน P_{Gij} เป็นค่าที่ได้จากปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิตนี้

3.1.2 ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย (Real power loss fuzzy minimization subproblem)

เพื่อที่จะทำให้ระบบมีการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าจริงต่ำที่สุด ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียจะถูกหาคำตอบ สลับกับปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต โดยที่ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียคือ

หาค่าต่ำสุดของ $$\Delta P_{loss} = \left[\frac{\mathbf{dP_{loss}}}{\mathbf{d|V|}} \quad \frac{\mathbf{dP_{loss}}}{\mathbf{dT}}\right]\begin{bmatrix}\Delta|\mathbf{V}| \\ \Delta\mathbf{T}\end{bmatrix} \tag{10}$$

โดยที่เป็นไปตามข้อจำกัดของขนาดของแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่บัส

$$\Delta|V_i^{\min}| \tilde{\leq} \Delta|V_i| \tilde{\leq} \Delta|V_i^{\max}|, \text{ for } i = 1,\ldots, NB, \tag{11}$$

เมื่อ

$$\Delta|V_i^{\min}| = |V_i^{\min}| - |V_i|, \text{ for } i = 1,\ldots, NB, \tag{12}$$

$$\Delta|V_i^{\max}| = |V_i^{\max}| - |V_i|, \text{ for } i = 1,\ldots, NB, \tag{13}$$

และเป็นไปตามข้อจำกัดของการปรับแท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\Delta T_i^{\min} \le \Delta T_i \le \Delta T_i^{\max}, \text{ for } i = 1,\ldots, NT, \tag{14}$$

เมื่อ

$$\Delta T_i^{\min} = T_i^{\min} - T_i, \text{ for } i = 1,\ldots, NT, \tag{15}$$

$$\Delta T_i^{\max} = T_i^{\max} - T_i, \text{ for } i = 1,\ldots, NT, \tag{16}$$

$$Q_{Gi}^{\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{\max} \tag{17}$$

$\frac{\mathbf{dP_{loss}}}{\mathbf{d|V|}}$ และ $\frac{\mathbf{dP_{loss}}}{\mathbf{dT}}$ สามารถหาได้จากเมตริกซ์ยูนิไฟจาโคเบียน (unified Jacobian matrix) [Mangoli et al, 1993] ซึ่งได้แสดงวิธีการโดยละเอียดใน [Chayakulkheeree and Ongsakul, 2005] $|V_i|$ และ T_i ที่เหมาะสมคือค่าที่ได้จากปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟิซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย

3.2 กระบวนการของ FCOPF

3.2.1 การวางหลักวิธีของโปรแกรมเชิงเส้นฟัซซี่ (Fuzzy Linear Programming, FLP) สำหรับปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟิซซี่ของต้นทุนการผลิต

ในการหาค่าต่ำสุดฟิซซี่ของต้นทุนการผลิต เราสามารถใช้วิธีการพิจารณาให้เป็นปัญหาที่มีวัตถุประสงค์ในเชิงฟิซซี่ซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีของฟิซซี่ [Zimmermann, 1987] ในการแก้ปัญหาได้ ดังนั้นปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟิซซี่ของต้นทุนการผลิตสามารถสร้างเป็นปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นฟิซซี่ (Fuzzy Linear Programming, FLP) ได้ในรูปของ

หาค่าสูงสุดของ $\min\{\mu_1(x), \mu_2(x), \ldots, \mu_{1+2\cdot NG+NC}(x)\}$, (18)

โดยที่ $\mathbf{B} \cdot \mathbf{P}_{Gij} \tilde{\leq} \mathbf{d}$, (19)

เมื่อ

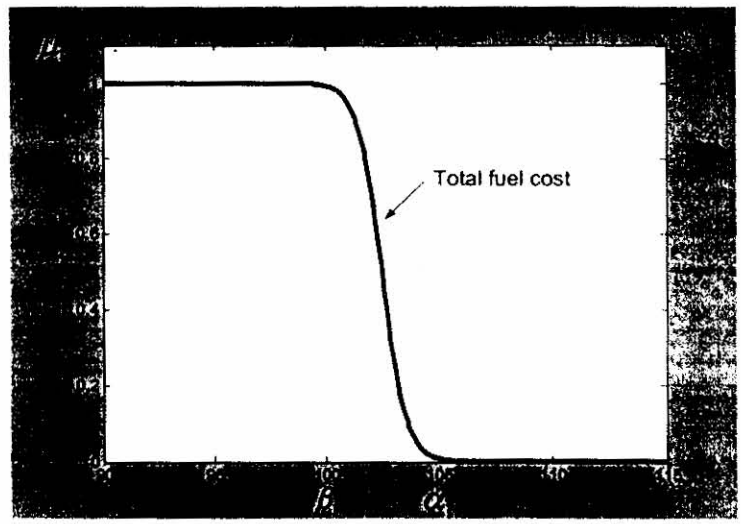
$$\mathbf{P}_{Gij} = \begin{bmatrix} P_{G11} \\ \vdots \\ P_{G,NG,NS_{NG}} \end{bmatrix}_{1\times \sum_{i\in G} NS_i} \quad (20)$$

และเป็นไปตามข้อจำกัดสมดุลของกำลังงานไฟฟ้าในสมการที่ (2) และ (3), ขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของ $\mathbf{P}_{Gij}$ ในสมการที่ (6), และข้อจำกัดในอสมการที่ (9)

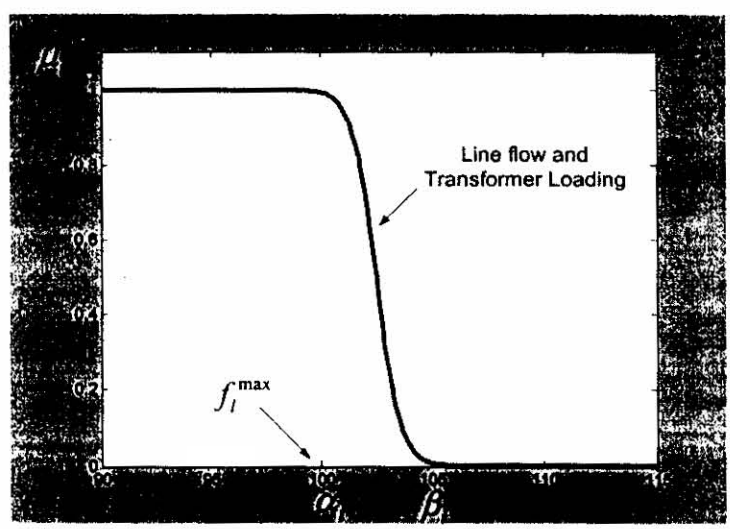
d คือเวคเตอร์ที่แทนข้อจำกัดแบบฟัซซี่ในสมการที่ (7) และ(8) แถวต่าง ๆ ในเมตริกซ์ **B** ในสมการที่ (19) จะถูกแทนด้วยฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ (fuzzy membership functions) หรือ $\mu_i(x)$ โดย $\mu_i(x)$ เป็นค่าระดับของความพึงพอใจของฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์และข้อจำกัดฟัซซี่ i ที่มีต่อ $\mathbf{P}_{Gij}$ ในที่นี้ $\mu_1(x)$ คือระดับความพึงพอใจของฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่มีต่อ $\mathbf{P}_{Gij}$ และ $\mu_2(x)$ ถึง $\mu_{1+2\cdot NG}(x)$ คือระดับความพึงพอใจของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของอัตราการเพิ่มและลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต่อ $\mathbf{P}_{Gij}$ และถ้ามีสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้ามีกำลังงานไหลผ่านเกินกว่าพิกัดกำลังจำนวนรวม NC แห่ง $\mu_{2+2\cdot NG}(x)$ ถึง $\mu_{2+2\cdot NG+NC}(x)$ จะแทนค่าระดับความพึงพอใจของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และในหม้อแปลงไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ จะใช้ฟังก์ชั่นไฮเปอร์โบลิกในการแทนคุณสมบัติฟัซซี่ของข้อจำกัดในระบบ [Zimmermann, 1987; Chayakulkheeree and Ongsakul, 2005] โดยสามารถเขียนแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ (21)

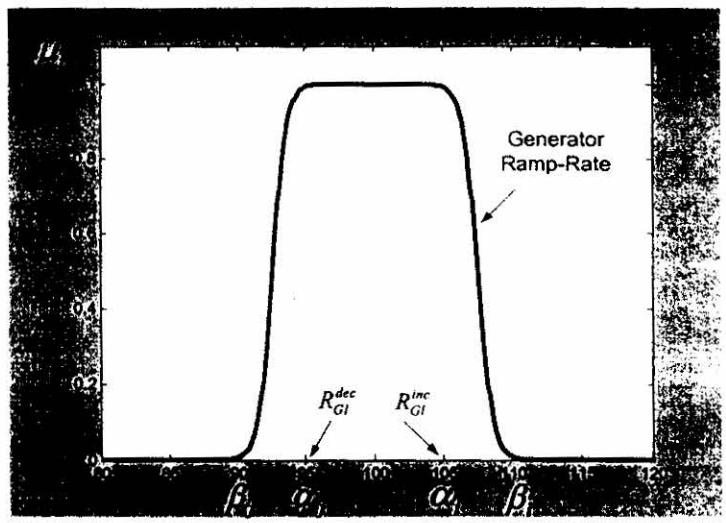
$$\mu_i(x) = \frac{1}{2} \cdot \tanh\left(\left(\mathbf{B}_i \cdot \mathbf{P}_{Gij} - \frac{\alpha_i + \beta_i}{2}\right) \cdot \gamma_i\right) + \frac{1}{2} \quad (21)$$



ภาพประกอบ 3.2 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของค่าเชื้อเพลิงรวมในการผลิต



ภาพประกอบ 3.3 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่งและในหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3.4 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของอัตราการเพิ่มและลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยที่ α_i β_i และ γ_i เป็นค่าที่แสดงรูปร่างของฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก $\mu_i(x)$ ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้พิจารณา และ $\mathbf{B}_i$ คือแถวที่ i ของเมตริกซ์ **B** ซึ่งในการกำหนดฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกของฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์นั้น α_i จะได้จากค่าเชื้อเพลิงรวมต่ำสุดที่ได้จากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นในขณะที่กำหนดข้อจำกัดทุกค่าไว้ที่ขอบเขตปกติ (normal limit) ในทางกลับกัน β_i จะได้จากค่าเชื้อเพลิงรวมต่ำสุดที่ได้จากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ในขณะที่กำหนดข้อจำกัดทุกค่าไว้ที่ค่าผ่อนปรนมากที่สุดที่ยอมรับได้ ส่วน γ_i จะหาจาก α_i / β_i ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2 สำหรับข้อจำกัดกำลังงานสูงสุดที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า ค่า α_i จะแทนด้วยค่ากำลังงานสูงสุดที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติ (normal line flow limit or transformer loading) ส่วน β_i จะแทนด้วยค่า 110% ของกำลังงานสูงสุดที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติ γ_i จะหาได้จาก α_i / β_i ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3 ในกรณีของข้อจำกัดของอัตราการเพิ่มและลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า β_i จะแทนด้วยค่าอัตราการเพิ่ม และลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติ ส่วน α_i จะแทนด้วยค่า 110% ของอัตราการเพิ่มและลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติ สำหรับ γ_i นั้นหาได้จาก α_i / β_i ดังแสดงในภาพประกอบ 3.4

จากฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกที่ได้กำหนด จะสามารถเขียนแสดงเป็นปัญหาค่าสูงสุดแบบฟัซซี่ได้เป็น

หาค่าสูงสุดของ μ', (22)

โดยที่ $\mu' \leq \mu_i(x)$, for $i = 1,\ldots,2+1NG+NC$, (23)

และ $0 \leq \mu' \leq 1$, (24)

และเป็นไปตามข้อจำกัดสมดุลกำลังงานไฟฟ้าในสมการที่ (2) และ (3) ข้อจำกัดขอบเขต $\mathbf{P}_{Gij}$ ของในสมการที่ (6) และข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ในสมการที่ (9)

3.2.2 การวางหลักวิธีของโปรแกรมเชิงเส้นฟัซซี่สำหรับปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย

ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย ในการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดสามารถแสดงได้เป็น

หาค่าสูงสุดของ $\min\{\lambda_1(x), \lambda_2(x),\ldots, \lambda_{1+NB}(x)\}$, (25)

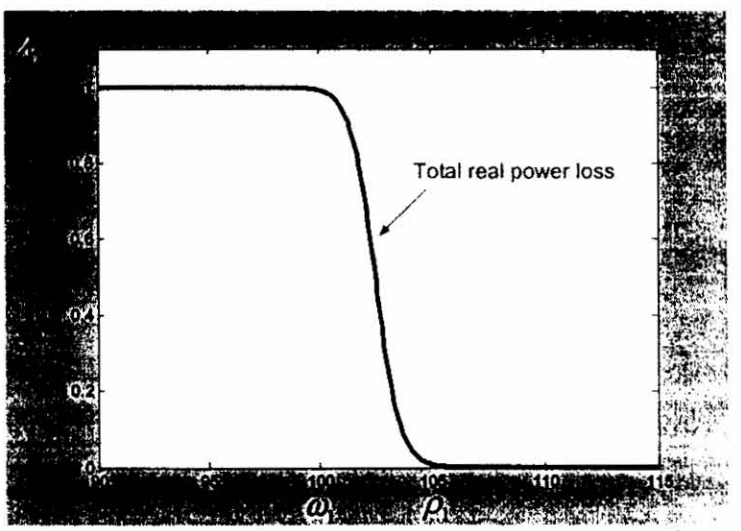
โดยที่ $\mathbf{G}\cdot\begin{bmatrix}\mathbf{V}\\ \mathbf{T}\end{bmatrix} \tilde{\leq} \mathbf{h}$, (26)

และเป็นไปตามข้อจำกัดสมดุลกำลังงานไฟฟ้าในสมการที่ (2) และ (3) ข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ในสมการที่ (14) และ (17) และข้อจำกัดขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของ **V** และ **T** ในสมการที่ (12) (13) (15) และ (16)

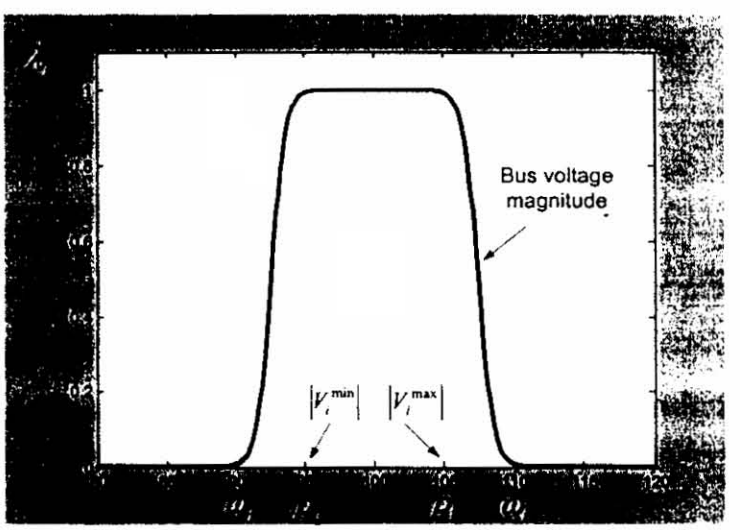
h คือเวคเตอร์แสดงข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ในสมการที่ (11) โดยในแต่ละแถวของ **G** ในสมการที่ (26) จะแสดงแทนค่าความระดับความพึงพอใจของเวคเตอร์ $[\mathbf{V}\ \mathbf{T}]^T$ ที่มีต่อฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ฟัซซี่หรือข้อจำกัดฟัซซี่ โดย $\lambda_1(x)$ จะแสดงฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ในสมการที่ (10) และ $\lambda_i(x)$ เมื่อ $i > 1$ จะแสดงแทนข้อจำกัดฟัซซี่ของสมการที่ (11)ฟังก์ชั่นในการแทนคุณสมบัติฟัซซี่ของวัตถุประสงค์ และข้อจำกัดฟัซซี่ของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะใช้ฟังก์ชั่นไฮเปอร์โบลิกเช่นเดียวกับปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต โดยสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\lambda_i(x) = \frac{1}{2}\cdot\tanh\left(\left(\mathbf{G}_i\begin{bmatrix}\mathbf{V}\\ \mathbf{T}\end{bmatrix} - \frac{\rho_i + \omega_i}{2}\right)\cdot\sigma_i\right) + \frac{1}{2} \quad (27)$$

โดยที่ G_i คือแถวที่ i ของ G และ ρ_1 คือค่ากำลังงานสูญเสียต่ำสุดที่หาโดยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ในขณะที่กำหนดข้อจำกัดทุกค่าไว้ที่ค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ ในทางกลับกัน ω_1 จะได้จากค่ากำลังงานสูญเสียต่ำสุดที่หาโดยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ในขณะที่กำหนดข้อจำกัดทุกค่าไว้ที่ค่าผ่อนปรนมากที่สุดที่ยอมรับได้ σ_1 จะหาได้จาก ρ_1 / ω_1 ดังแสดงในภาพประกอบ 3.5 และสำหรับข้อจำกัดฟัซซี่ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด ค่า ρ_i เมื่อ $i = 2,\ldots,1+NB$ จะกำหนดไว้ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแรงดันที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติ และค่า ω_i เมื่อ $i = 2,\ldots,1+NB$ จะกำหนดไว้ที่ค่า 105% ของค่าสูงสุดและ 95 % ของค่าต่ำสุดของแรงดันที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติ σ_i จะหาจาก ρ_i / ω_i ทั้งในกรณีของขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบ 3.6



ภาพประกอบ3. 5 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของกำลังงานจริงสูญเสียทั้งหมดในระบบ



ภาพประกอบ 3.6 ค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของข้อจำกัดแบบฟัซซี่ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส

ดังนั้น ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียในระบบจะสามารถแทนด้วยปัญหาค่าสูงสุดฟัซซี่ได้ดังสมการ

หาค่าสูงสุดของ λ' (28)

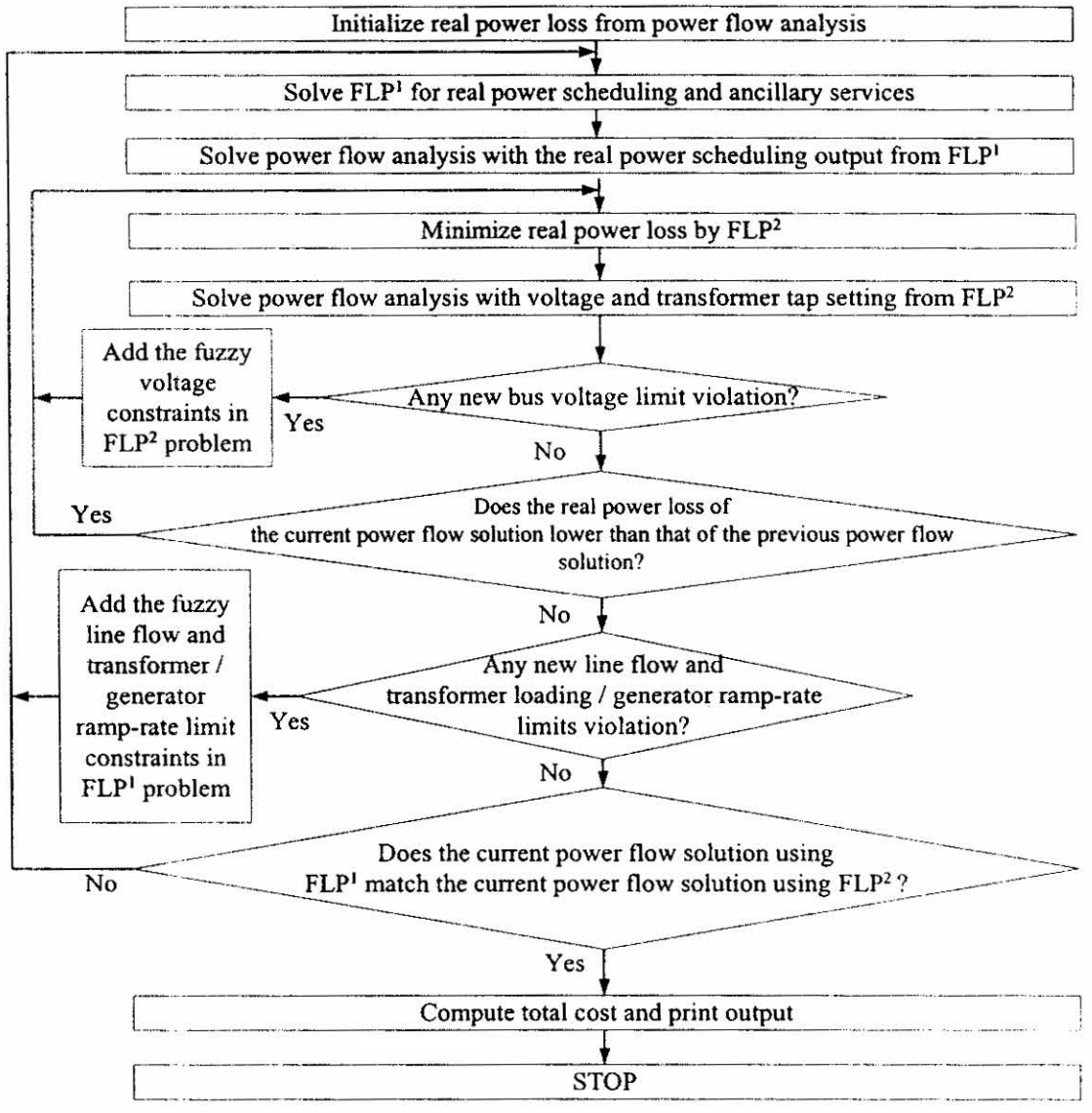
โดยที่ $\lambda' \leq \lambda_i(x)$, for i = 1,..., NB, (29)

และ $0 \leq \lambda' \leq 1$, (30)

และเป็นไปตามข้อจำกัดสมดุลกำลังงานไฟฟ้าในสมการที่ (2) และ (3) ข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ในสมการที่ (14) และ (17) และข้อจำกัดขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของ **V** และ **T** ในสมการที่ (12) (13) (15) และ (16)

3.2.3 กระบวนการคำนวณ

กระบวนการคำนวณการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้า ที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีข้อจำกัดฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.7 โดย FLP^1 คือวิธีการโปรแกรมฟัซซี่เชิงเส้นในหัวข้อที่ 3.1 และ FLP^2 คือวิธีการโปรแกรมฟัซซี่เชิงเส้นในหัวข้อที่ 3.2



ภาพประกอบ 3.7 กระบวนการคำนวณการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีข้อจำกัดฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น

บทที่ 4

การทดสอบวิธีการ

การทดสอบกระทำโดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณวิธีการที่เสนอ ระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำมาใช้คือ ระบบทดสอบที่ใช้คือระบบมาตรฐาน 30 บัส และ 118 บัสของ IEEE โดยได้มีการทดสอบภายใต้สถานการณ์จำลองต่าง ๆ และเปรียบเทียบวิธีการคำนวณโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับปัญหา OPF ที่มีข้อจำกัดแบบฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น ในระบบไฟฟ้ากำลัง จะมีข้อดีและข้อจำกัดอะไรบ้างเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีข้อจำกัดแบบฟัซซี่แบบเป็นเชิงเส้น และแบบกรอบคงที่

4.1 การทดสอบกระบวนการ FCOPF กับระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

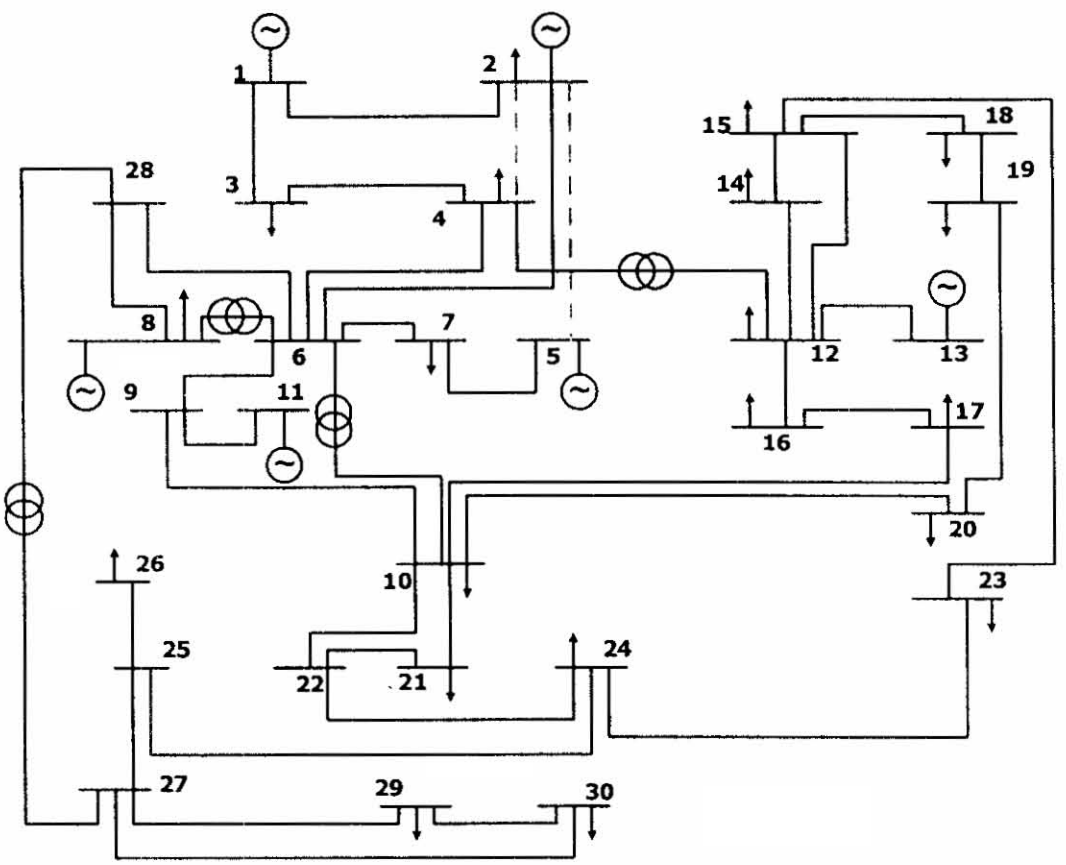
ระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE ที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการแก้ปัญหา OPF ที่มีข้อจำกัดแบบฟัซซี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 4.1 โดยข้อมูลของระบบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ตาราง 4.1 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังงานจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ โดยสามารถประมาณเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นที่ไม่ต่อเนื่องกันได้ดังภาพประกอบ 4.2 ในการทดสอบแบบจำลอง จะกำหนดให้ค่าแรงดันที่บัสมีขอบเขตอยู่ในช่วง 0.95-1.1 p.u. และอัตราการเพิ่มและลดกำลังการผลิตได้แสดงไว้ในตาราง 4.1

ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

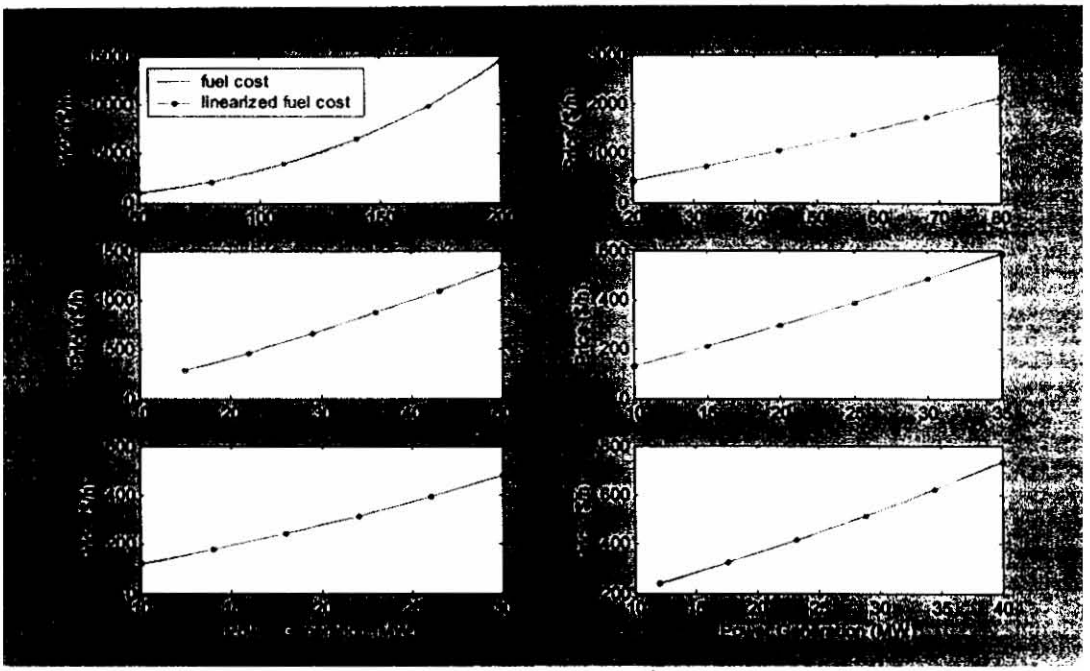
- กรณีศึกษาภายในสภาวะการทำงานปกติของระบบ (base case)
- กรณีที่มีสายส่งไฟฟ้าผิดพร่อง (line outage case) ซึ่งจะเป็นสถานการณ์สมมติให้สายส่งไฟฟ้าระหว่างบัส 2 กับบัส 5 และบัส 2 กับบัส 4 หลุดออกจากระบบ ดังแสดงด้วยเส้นประในภาพประกอบ 4.1

ตาราง 4.1 ฟังก์ชั่นค่าใช้จ่ายในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขอบเขตการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Gen bus	Min (MW)	Max (MW)	$F(P_{Gi}) = a_i \cdot P_{Gi}^3 + b_i \cdot P_{Gi}^2 + c_i \cdot P_{Gi} + d_i$				Ramp Rate (MW/30min)	
			a_i	b_i	c_i	d_i	Up	Down
1	50	200	0.0010	0.092	14.5	-136	15	20
2	20	80	0.0004	0.025	22	-3.5	10	15
5	15	50	0.0006	0.075	23	-81	6	10
8	10	35	0.0002	0.1	13.5	-14.5	4	8
11	10	30	0.0013	0.12	11.5	-9.75	4	8
13	12	40	0.0004	0.084	12.5	75.6	5	10



ภาพประกอบ 4.1 แผนภาพเส้นเดียว (one-line diagram) ของระบบมาตรฐาน IEEE 30 บัส



ภาพประกอบ 4.2 ต้นทุนในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการทำให้เป็นเชิงเส้น

4.1.1 กรณีศึกษาภายในสภาวะการทำงานปกติของระบบ (base case)

การการทดสอบแบบจำลองในกรณีนี้จะใช้ระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE ที่ไม่ได้มีการปรับเปลี่ยน ซึ่งในกรณีนี้ผลที่ได้จากการหาคำตอบไม่ทำให้เกิดการทำงานที่เกินกว่าพิกัดของสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ

ผลการทดสอบการคำนวณแสดงให้เห็นว่าคำตอบของ OPF แบบมีข้อจำกัดกรอบคงที่ มีค่าต้นทุนรวมในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าจริงต่ำกว่าสภาวะการทำงานของระบบเริ่มต้น ในขณะที่คำตอบของ FCOPF มีค่าต้นทุนรวมในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าจริงต่ำที่สุด โดยมีค่าต่ำกว่าต้นทุนรวมในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าจริงในสภาวะการทำงานของระบบเริ่มต้น 1.8% และต่ำกว่าต้นทุนรวมในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าจริงของคำตอบของ OPF แบบมีข้อจำกัดกรอบคงที่ 0.6% นอกจากนี้การพิจารณาข้อจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสให้เป็นข้อจำกัดฟัซซี่ ยังทำให้ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียของคำตอบ FCOPF ต่ำกว่าของสภาวะการทำงานของระบบเริ่มต้น 18.25% และต่ำกว่าของ OPF แบบมีข้อจำกัดกรอบคงที่ 2.5% ทั้งนี้ในผลลัพธ์ของ FCOPF นั้นการเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 5 มีค่าสูงกว่าอัตราการเพิ่มกำลังการผลิตในสภาวะปกติอยู่ 5% ตาราง 4.2 แสดงผลลัพธ์ของกรณีศึกษาภายในสภาวะการทำงานปกติของระบบ

ตาราง 4.2 ผลลัพธ์ของกรณีศึกษาภายในสภาวะการทำงานปกติของระบบ

Description			Initial Point	Crisp constrained OPF	FCOPF
Control Variables	V (p.u.)	$\|V_1\|$	1.060	1.100	1.105
		$\|V_2\|$	1.045	1.097	1.104
		$\|V_5\|$	1.010	1.064	1.069
		$\|V_8\|$	1.010	1.066	1.071
		$\|V_{11}\|$	1.082	1.100	1.105
		$\|V_{13}\|$	1.071	1.100	1.105
	P_G (MW)	P_{G1}	72.6	66.9	59.3
		P_{G2}	70.0	69.0	76.5
		P_{G5}	40.0	46.0	46.3
		P_{G8}	35.0	35.0	35.0
		P_{G11}	30.0	30.0	30.0
		P_{G13}	40.0	40.0	40.0
	Tap	$T_{4\text{-}12}$	0.932	0.9880	0.9930
		$T_{6\text{-}9}$	0.978	1.0340	1.0390
		$T_{6\text{-}10}$	0.969	1.0250	1.0300
		$T_{28\text{-}27}$	0.968	1.0175	1.0231
Constraints Violation		$\|V_1\|$	-	1.100	1.105
		$\|V_2\|$	-	-	1.104
		$\|V_{11}\|$	-	-	1.105
		$\|V_{13}\|$	-	1.100	1.105
		R_{G5}^{up}	-	6.00	6.3
Total Power Generation (MW, MVAr)			287.62, 85.97	286.94, 79.67	286.85, 78.95
Total system loss (MW)			4.22	3.54	3.45
Total fuel cost ($/h)			6380.89	6307.28	6268.03

4.1.2 กรณีที่มีสายส่งไฟฟ้าผิดพร่อง (line outage case)

ในกรณีศึกษานี้จะเป็นสถานการณ์สมมติให้สายส่งไฟฟ้าระหว่างบัส 2 กับบัส 5 และบัส 2 กับบัส 4 หลุดออกจากระบบ ดังแสดงด้วยเส้นประในภาพประกอบ 4.1 ซึ่งจากการที่สายส่งสองเส้นไม่ได้อยู่ในสภาวะใช้งานนี้ได้ทำให้สายส่งระหว่างบัส 2 และ 6 ทำงานเกินกว่าพิกัดที่กำหนดคือ 65 MVA ตาราง 4.3 แสดงผลลัพธ์ของกรณีศึกษานี้

ตาราง 4.3 ผลลัพธ์ของกรณีที่สายส่งไฟฟ้าระหว่างบัส 2-4 และบัส 2-5 หลุดออกจากระบบ

Description			Initial Point	Crisp constrained OPF	FCOPF
Control Variables	V (p.u.)	$\|V_1\|$	1.060	1.100	1.105
		$\|V_2\|$	1.045	1.100	1.105
		$\|V_5\|$	1.010	1.032	1.038
		$\|V_8\|$	1.010	1.082	1.088
		$\|V_{11}\|$	1.082	1.100	1.105
		$\|V_{13}\|$	1.071	1.100	1.105
	P_G (MW)	P_{G1}	77.8	77.1	60.0
		P_{G2}	70.0	62.5	79.6
		P_{G5}	40.0	46.0	46.3
		P_{G8}	35.0	35.0	35.0
		P_{G11}	30.0	30.0	30.0
		P_{G13}	40.0	40.0	40.0
	Tap	$T_{4\text{-}12}$	0.932	1.004	1.0070
		$T_{6\text{-}9}$	0.978	1.050	1.0530
		$T_{6\text{-}10}$	0.969	1.041	1.0440
		$T_{28\text{-}27}$	0.968	1.023	1.0262
Constraints Violation		$f_{2\text{-}6}$	69.86	65.000	67.142
		$\|V_1\|$	-	1.100	1.105
		$\|V_2\|$	-	1.100	1.105
		$\|V_{11}\|$	-	1.100	1.105
		$\|V_{13}\|$	-	1.100	1.105
		R_{G5}^{up}	-	6.00	-
Total Power Generation (MW, MVAr)			292.75, 109.23	290.56, 100.19	290.43, 99.43
Total system loss (MW)			9.35	7.16	7.03
Total fuel cost ($/h)			6616.50	6551.09	6396.30

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า การหาคำตอบด้วยวิธี OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่จะให้คำตอบที่ทำให้กำลังงานไฟฟ้าที่ไหลระหว่างบัส 2 และ 6 มีค่าที่พิกัดพอดี (binding solution) และทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าสภาวะการทำงานเริ่มต้นด้วย อย่างไรก็ตามคำตอบของ FCOPF ยังมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าวิธี OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่อยู่อีก 2.4% จากการพิจารณาให้ข้อจำกัดในระบบเป็นแบบฟัซซี่ นอกจากนี้ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียของคำตอบจาก FCOPF ยังมีค่าต่ำกว่าคำตอบของวิธี OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่อยู่ 1.8% ทั้งนี้ กำลังงานไฟฟ้าที่ไหลระหว่างบัส 2 และ 6 ในคำตอบ FCOPF มีค่าเท่ากับ 67.142 MVA ซึ่งสูงกว่าพิกัดการทำงานในสภาวะปกติอยู่ 3.29% เห็นได้ชัดว่ากระบวนการหาคำตอบ FCOPF ที่เสนอมีประสิทธิภาพในการชั่งน้ำหนักระหว่างข้อจำกัดของโครงข่าย และข้อจำกัดอัตราการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิต

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กับค่าใช้จ่ายรวมในการผลิต และระหว่างข้อจำกัดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส และกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียได้

4.2 การทดสอบกระบวนการ FCOPF กับระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส

เนื่องจากในระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE จะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายกำลังงานไฟฟ้าจริงออกมาจำนวนหนึ่งซึ่งถูกพิจารณาเป็นบัสที่มีแหล่งจ่ายกำลังงานเสมือนและเป็นบัสควบคุมแรงดัน (Voltage Control Bus) และมีบางบัสมีกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นในการทดสอบจะกำหนดให้บัสดังกล่าวค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงเป็นศูนย์แต่พิจารณาให้เป็นบัสควบคุมแรงดัน ดังนั้นทดสอบแบบจำลองกับระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE จะใช้ข้อมูลที่มีการปรับปรุงเล็กน้อยดังแสดงในภาคผนวก ข.

ผลสรุปการไหลของกำลังงานไฟฟ้าของระบบ IEEE 118 bus ที่มีการปรับปรุง ในกรณีที่ใช้ OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ และในกรณีที่ใช้ FCOPF มีดังนี้

ผลสรุปการไหลของกำลังงานไฟฟ้าของระบบ IEEE 118 bus ที่มีการปรับปรุง

Total Generation	=	3836.37 MW	-295.99 MVAR
Total P-Q Load	=	3668.00 MW	1398.74 MVAR
SHUNT VAR	=		-103.08 MVAR
Total Power Losses	=	168.37 MW	-1797.81 MVAR
Overall P Mismatch	=	-0.0000 MW	
Generation Cost	=	**319741.665 $/h**	

ผลสรุปการไหลของกำลังงานไฟฟ้าของระบบ IEEE 118 bus โดย OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่

Total Generation	=	3871.17 MW	-31.11 MVAR
Total P-Q Load	=	3668.00 MW	1399.06 MVAR
SHUNT VAR	=		-103.32 MVAR
Total Power Losses	=	203.17 MW	-1533.49 MVAR
Overall P Mismatch	=	-0.0000 MW	
Generation Cost	=	**299746.125 $/h**	

ผลสรุปการไหลของกำลังงานไฟฟ้าของระบบ IEEE 118 bus โดย FCOPF

Total Generation	=	3856.23 MW	-260.56 MVAR
Total P-Q Load	=	3668.00 MW	1467.66 MVAR
SHUNT VAR	=		-111.48 MVAR
Total Power Losses	=	188.23 MW	-1839.70 MVAR
Overall P Mismatch	=	-0.0000 MW	
Generation Cost	=	**299702.831 $/h**	

ในกรณีของการหาคำตอบการไหลที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยวิธี FCOPF ที่นำเสนอจะมีผลให้การไหลของกำลังงานไฟฟ้าระหว่างบัส 68 และ 65 มีค่าเท่ากับ 549.344 MVA ซึ่งสูงกว่าพิกัดกำลังงานของสายอยู่ประมาณ 0.797 % ส่วนในกรณีการหาคำตอบด้วยวิธีการ OPF แบบกรอบคงที่จะให้คำตอบที่มีการไหลของกำลังงานไฟฟ้าระหว่างบัส 68 และ 65 เท่ากับค่าที่พิกัดของสายพอดี ผลการไหลของกำลังงานโดยละเอียดของแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

จากผลลัพธ์ที่ได้ คำตอบของ FCOPF ยังมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าวิธี OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ 43.3 $/h ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะเป็นปริมาณไม่มากนักแต่ในระบบที่มีขนาดใหญ่หรือในบางกรณี ก็จะมีผลต่อการประหยัดที่ได้มากเมื่อพิจารณาในระยะยาว เป็นการยืนยันว่ากระบวนการหาคำตอบ FCOPF ที่เสนอมีประสิทธิภาพในการชั่งน้ำหนักระหว่างข้อจำกัดของโครงข่าย และข้อจำกัดอัตราการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กับค่าใช้จ่ายรวมในการผลิต และระหว่างข้อจำกัดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียได้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำงานพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของ OPF ที่มีข้อจำกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่ง และขนาดแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดของบัส รวมไปถึงข้อจำกัดอัตราการเพิ่มหรือลดกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบฟัซซี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยได้แยกปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต (Total fuel cost fuzzy minimization subproblem) และ ปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสีย (Real power loss fuzzy minimization subproblem) และได้ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการคำนวณกับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 30 บัส และ 118 บัส ของ IEEE

จากผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอพบว่ากระบวนการหาคำตอบ FCOPF ที่เสนอสามารถหาคำตอบที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดโดยมีข้อจำกัดพิกัดกำลังของระบบส่งไฟฟ้าและข้อจำกัดอัตราการเพิ่มและลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบฟัซซี่ในปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของต้นทุนการผลิต และ สามารถหาคำตอบที่มีกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียโดยมีข้อจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นแบบฟัซซี่ในปัญหาย่อยการหาค่าต่ำสุดฟัซซี่ของกำลังงานไฟฟ้าจริงสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้โปรแกรมฟัซซี่เชิงเส้น ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ได้คำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการหาคำตอบ OPF ที่มีข้อจำกัดแบบกรอบคงที่ ทั้งนี้การนำวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานสามารถทำได้โดยการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังจริงที่จะนำไปใช้และสามารถใช้เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) ที่แนะนำผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังได้

การพัฒนางานวิจัยที่จะเป็นประโยชน์ต่อไปคือการพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองให้รวมถึงการเปิด-ปิดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) หรือตัวเหนี่ยวนำ (Reactor) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะต้องใช้วิธีการคำนวณแบบรวมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer) เข้ามาช่วย โดยจะมีแนวโน้มที่ทำให้ได้จุดทำงานในระบบที่มีต้นทุนต่ำลงอีก นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาแบบจำลองให้รวมถึงผลการเกิดมลภาวะในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Emissions) ได้ เนื่องจากโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำอาจก่อให้เกิดมลภาวะสูง โดยทำการเพิ่มฟังก์ชั่นการเกิดมลภาวะจากการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปในแบบจำลองที่นำเสนอและใช้วิธีการคำนวณโปรแกรมฟัซซี่เชิงเส้นในการชั่งน้ำหนักในลักษณะของการคำนวณแบบมากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ (Multi-Objective) ได้

บรรณานุกรม

Bibliography

Abdul-Rahman K. H. and Shahidehpour S. M. "A Fuzzy-Based Optimal Reactive Power Control," **IEEE Transaction on Power System.** 8(2); pp. 662-670; 1993.

Attaviriyanupap P., Kita H., Tanaka E., and Hasegawa J. "A Hybrid EP and SQP for Dynamic Economic Dispatch with Nonsmooth Fuel Cost Function," **IEEE Transaction on Power System.** 17(2); pp. 411-416; 2002.

Bakirtzis A. G., Biskas P. N., Zoumas C. E., and Petridis V. "Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm," **IEEE Transaction on Power System.** 17(2); pp. 229-236; 2002.

Chen P. H. and Chang H. C. "Large-Scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm," **IEEE Transaction on Power System.** 10(4); pp. 1919-1926; 1995.

Damousis I. G., Bakirtzis A. G., and Dokopoulos P. S. "Network-Constrained Economic Dispatch Using Real-Coded Genetic Algorithm," **IEEE Transaction on Power System.** 18(1); pp. 198-205; 2003.

Edwin Liu W.-H. and Guan X. "Fuzzy Constraint Enforcement and Control Action Curtailment in an Optimal Power Flow," **IEEE Transaction on Power System.** 11(2); pp. 639-645; 1996.

El-Hawary M. E. and Mbamalu G. A. N. "A Comparison of Probabilistic Perturbation and Deterministic Based Optimal Power Flow Solutions," **IEEE Transaction on Power System.** 6(3); pp. 1099-1105; 1991.

Guan X., Edwin Liu W.-H. and Papalexopoulos A. D. "Application of Fuzzy Set Method in an Optimal Power flow," **Electric Power Systems Research.** 34; pp. 11-18; 1995.

Lin W. M., Cheng F. S., and Tsay M. T. "An Improved Tabu Search for Economic Dispatch with Multiple Minima," **IEEE Transaction on Power System.** 17(1); pp. 108-112; 2002.

Lin W. M., Cheng F. S., and Tsay M. T. "Nonconvex Economic Dispatch by Integrated Artificial Intelligence," **IEEE Transaction on Power System.** 16(2); pp. 307-311; 2001.

Tomsovic K. "Fuzzy Linear Programming Approach to the Reactive Power/Voltage Control Problem," **IEEE Transaction on Power System.** 7(1); pp. 287-293; 1992.

Walters D. C. and Sheble' G. B. "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading," **IEEE Transaction on Power System.** 8(3); pp. 1325-1332; 1993.

Yang H. T., Yang P. C., and Huang C. L. "Evolutionary Programming Based Economic Dispatch for Units with Non-Smooth Fuel Cost Functions," **IEEE Transaction on Power System.** 11(1); pp. 112-118; 1996.

Yuryevich J. and Wong K. P. "Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm," **IEEE Transaction on Power System.** 14(4); pp. 1245-1250; 1999.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

ภาคผนวก ก. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

Transmission Line Data

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
1	2	0.0192	0.0575	0.0264	130
1	3	0.0452	0.1852	0.0204	130
2	4	0.057	0.1737	0.0184	65
3	4	0.0132	0.0379	0.0042	130
2	5	0.0472	0.1983	0.0209	130
2	6	0.0581	0.1763	0.0187	65
4	6	0.0119	0.0414	0.0045	90
5	7	0.046	0.116	0.0102	70
6	7	0.0267	0.082	0.0085	130
6	8	0.012	0.042	0.0045	32
6	9	0	0.208	0	65
6	10	0	0.556	0	32
9	11	0	0.208	0	65
9	10	0	0.11	0	65
4	12	0	0.256	0	65
12	13	0	0.14	0	65
12	14	0.1231	0.2559	0	32
12	15	0.0662	0.1304	0	32
12	16	0.0945	0.1987	0	32
14	15	0.221	0.1997	0	16
16	17	0.0824	0.1932	0	16
15	18	0.1073	0.2185	0	16
18	19	0.0639	0.1292	0	16
19	20	0.034	0.068	0	32
10	20	0.0936	0.209	0	32
10	17	0.0324	0.0845	0	32
10	21	0.0348	0.0749	0	32
10	22	0.0727	0.1499	0	32
21	22	0.0116	0.0236	0	16
15	23	0.1	0.202	0	16
22	24	0.115	0.179	0	16
23	24	0.132	0.27	0	16
24	25	0.1885	0.3292	0	32
25	26	0.2544	0.38	0	32
25	27	0.1093	0.2087	0	16
27	28	0	0.396	0	65
27	29	0.2198	0.4153	0	16
27	30	0.3202	0.6027	0	16
29	30	0.2399	0.4533	0	16
8	28	0.0636	0.2	0.0214	32
6	28	0.0169	0.0599	0.0065	32

Transformer Data

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	TAP	MVA
4	12	0	0.256	0.932	65
6	9	0.00001	0.208	0.978	65
6	10	0.00001	0.556	0.969	32
28	27	0.00001	0.396	0.968	65

Shunt Components

At Bus	R (p.u.)	X (p.u.)
10	0	-5.2632
24	0	-23.2558

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส

- Network data
- Power Flow Results

ภาคผนวก ข. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส

Network data

Transmission Line Data

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
1	2	0.0303	0.0999	0.0254	200
1	3	0.0129	0.0424	0.0108	200
4	5	0.0018	0.0080	0.0021	300
3	5	0.0241	0.1080	0.0284	200
5	6	0.0119	0.0540	0.0143	200
6	7	0.0046	0.0208	0.0055	200
8	9	0.0024	0.0305	1.1620	545
9	10	0.0026	0.0322	1.2300	545
4	11	0.0209	0.0688	0.0175	200
5	11	0.0203	0.0682	0.0174	200
11	12	0.0060	0.0196	0.0050	200
2	12	0.0187	0.0616	0.0157	200
3	12	0.0484	0.1600	0.0406	200
7	12	0.0086	0.0340	0.0087	200
11	13	0.0223	0.0731	0.0188	200
12	14	0.0215	0.0707	0.0182	200
13	15	0.0744	0.2444	0.0627	200
14	15	0.0595	0.1950	0.0502	200
12	16	0.0212	0.0834	0.0214	200
15	17	0.0132	0.0437	0.0444	200
16	17	0.0454	0.1801	0.0466	200
17	18	0.0123	0.0505	0.0130	200
18	19	0.0112	0.0493	0.0114	200
19	20	0.0252	0.1170	0.0298	200
15	19	0.0120	0.0394	0.0101	200
20	21	0.0183	0.0849	0.0216	200
21	22	0.0209	0.0970	0.0246	200
22	23	0.0342	0.1590	0.0404	200
23	24	0.0135	0.0492	0.0498	300
23	25	0.0156	0.0800	0.0864	200
25	27	0.0318	0.1630	0.1764	200
27	28	0.0191	0.0855	0.0216	200
28	29	0.0237	0.0943	0.0238	200
8	30	0.0043	0.0504	0.5140	200
26	30	0.0080	0.0860	0.9080	200
17	31	0.0474	0.1563	0.0399	200
29	31	0.0108	0.0331	0.0083	200
23	32	0.0317	0.1153	0.1173	200
31	32	0.0298	0.0985	0.0251	200
27	32	0.0229	0.0755	0.0193	200
15	33	0.0380	0.1244	0.0319	200

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
19	34	0.0752	0.2470	0.0632	200
35	36	0.0022	0.0102	0.0027	200
35	37	0.0110	0.0497	0.0132	200
33	37	0.0415	0.1420	0.0366	200
34	36	0.0087	0.0268	0.0057	200
34	37	0.0026	0.0094	0.0098	300
37	39	0.0321	0.1060	0.0270	200
37	40	0.0593	0.1680	0.0420	200
30	38	0.0046	0.0540	0.4220	300
39	40	0.0184	0.0605	0.0155	200
40	41	0.0145	0.0487	0.0122	200
40	42	0.0555	0.1830	0.0466	200
41	42	0.0410	0.1350	0.0344	200
43	44	0.0608	0.2454	0.0607	200
34	43	0.0413	0.1681	0.0423	200
44	45	0.0224	0.0901	0.0224	200
45	46	0.0400	0.1356	0.0332	200
46	47	0.0380	0.1270	0.0316	200
46	48	0.0601	0.1890	0.0472	200
47	49	0.0191	0.0625	0.0160	200
42	49	0.0357	0.1615	0.1720	250
45	49	0.0684	0.1860	0.0444	200
48	49	0.0179	0.0505	0.0126	200
49	50	0.0267	0.0752	0.0187	200
49	51	0.0486	0.1370	0.0342	200
51	52	0.0203	0.0588	0.0140	200
52	53	0.0405	0.1635	0.0406	200
53	54	0.0263	0.1220	0.0310	200
49	54	0.0399	0.1451	0.1468	200
54	55	0.0169	0.0707	0.0202	200
54	56	0.0028	0.0096	0.0073	200
55	56	0.0049	0.0151	0.0037	200
56	57	0.0343	0.0966	0.0242	200
50	57	0.0474	0.1340	0.0332	200
56	58	0.0343	0.0966	0.0242	200
51	58	0.0255	0.0719	0.0179	200
54	59	0.0503	0.2293	0.0598	200
56	59	0.0407	0.1224	0.1105	200
55	59	0.0474	0.2158	0.0565	200
59	60	0.0317	0.1450	0.0376	200
59	61	0.0328	0.1500	0.0388	200
60	61	0.0026	0.0135	0.0146	250
60	62	0.0123	0.0561	0.0147	200
61	62	0.0082	0.0376	0.0098	200
63	64	0.0017	0.0200	0.2160	400
38	65	0.0090	0.0986	1.0460	500
64	65	0.0027	0.0302	0.3800	500
49	66	0.0090	0.0459	0.0496	500

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
62	66	0.0482	0.2180	0.0578	200
62	67	0.0258	0.1170	0.0310	200
66	67	0.0224	0.1015	0.0268	200
65	68	0.0014	0.0160	0.6380	545
47	69	0.0844	0.2778	0.0709	250
49	69	0.0985	0.3240	0.0828	250
69	70	0.0300	0.1270	0.1220	400
24	70	0.0022	0.4115	0.1020	200
70	71	0.0088	0.0355	0.0088	200
24	72	0.0488	0.1960	0.0488	200
71	72	0.0446	0.1800	0.0444	200
71	73	0.0087	0.0454	0.0118	200
70	74	0.0401	0.1323	0.0337	200
70	75	0.0428	0.1410	0.0360	200
69	75	0.0405	0.1220	0.1240	300
74	75	0.0123	0.0406	0.0103	200
76	77	0.0444	0.1480	0.0368	200
69	77	0.0309	0.1010	0.1038	200
75	77	0.0601	0.1999	0.0498	200
77	78	0.0038	0.0124	0.0126	200
78	79	0.0055	0.0244	0.0065	200
77	80	0.0109	0.0332	0.0700	400
79	80	0.0156	0.0704	0.0187	200
68	81	0.0018	0.0202	0.8080	500
77	82	0.0298	0.0853	0.0817	200
82	83	0.0112	0.0367	0.0380	400
83	84	0.0625	0.1320	0.0258	200
83	85	0.0430	0.1480	0.0348	200
84	85	0.0302	0.0641	0.0123	200
85	86	0.0350	0.1230	0.0276	200
86	87	0.0283	0.2074	0.0445	200
85	88	0.0200	0.1020	0.0276	200
85	89	0.0239	0.1730	0.0470	200
88	89	0.0139	0.0712	0.0193	300
89	90	0.0164	0.0652	0.1588	300
90	91	0.0254	0.0836	0.0214	200
89	92	0.0080	0.0383	0.0962	545
91	92	0.0387	0.1272	0.0327	200
92	93	0.0258	0.0848	0.0218	250
92	94	0.0481	0.1580	0.0406	250
93	94	0.0223	0.0732	0.0188	250
94	95	0.0132	0.0434	0.0111	200
80	96	0.0356	0.1820	0.0494	200
82	96	0.0162	0.0530	0.0544	200
94	96	0.0269	0.0869	0.0230	200
80	97	0.0183	0.0934	0.0254	200
80	98	0.0238	0.1080	0.0286	200
80	99	0.0454	0.2060	0.0546	200

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
92	100	0.0648	0.2950	0.0472	200
94	100	0.0178	0.0580	0.0604	300
95	96	0.0171	0.0547	0.0147	200
96	97	0.0173	0.0885	0.0240	200
98	100	0.0397	0.1790	0.0476	200
99	100	0.0180	0.0813	0.0216	200
100	101	0.0277	0.1262	0.0328	200
92	102	0.0123	0.0559	0.0146	200
101	102	0.0246	0.1120	0.0294	200
100	103	0.0160	0.0525	0.0536	300
100	104	0.0451	0.2040	0.0541	200
103	104	0.0466	0.1584	0.0407	200
103	105	0.0535	0.1625	0.0408	200
100	106	0.0605	0.2290	0.0620	200
104	105	0.0099	0.0378	0.0099	200
105	106	0.0140	0.0547	0.0143	200
105	107	0.0530	0.1830	0.0472	200
105	108	0.0261	0.0703	0.0184	200
106	107	0.0530	0.1830	0.0472	200
108	109	0.0105	0.0288	0.0076	200
103	110	0.0391	0.1813	0.0461	200
109	110	0.0278	0.0762	0.0202	200
110	111	0.0220	0.0755	0.0200	200
110	112	0.0247	0.0640	0.0620	200
17	113	0.0091	0.0301	0.0077	200
32	113	0.0615	0.2030	0.0518	200
32	114	0.0135	0.0612	0.0163	200
27	115	0.0164	0.0741	0.0197	200
114	115	0.0023	0.0104	0.0028	200
68	116	0.0003	0.0041	0.1640	200
12	117	0.0329	0.1400	0.0358	200
75	118	0.0145	0.0481	0.0120	200
76	118	0.0164	0.0544	0.0136	200

Transformer Data

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	Tap	MVA
8	5	0	0.0267	0.985	500
26	25	0	0.0382	0.96	300
30	17	0	0.0388	0.96	500
38	37	0	0.0375	0.935	500
63	59	0	0.0386	0.96	500
64	61	0	0.0268	0.985	300
65	66	0	0.037	0.935	300
68	69	0	0.037	0.935	500
81	80	0	0.037	0.935	500

Shunt Components

At Bus	R (p.u.)	X (p.u.)
5	0	-2.5
34	0	-7.14
37	0	4
44	0	10
45	0	10
46	0	10
48	0	6.67
74	0	8.33
79	0	5
82	0	5
83	0	10
105	0	5
107	0	16.67
110	0	16.67

Load Data

At Bus	MW	MVAr
1	51	27
2	20	9
3	39	10
4	30	12
6	52	22
7	19	2
11	70	23
12	47	10
13	34	16
14	14	1
15	90	30
16	25	10
17	11	3
18	60	34
19	45	25
20	18	3
21	14	8
22	10	5
23	7	3
27	62	13
28	17	7
29	24	4
31	43	27
32	59	23
33	23	9

At Bus	MW	MVAr
34	59	26
35	33	9
36	31	17
39	27	11
40	20	23
41	37	10
42	37	23
43	18	7
44	16	8
45	53	22
46	28	10
47	34	0
48	20	11
49	87	30
50	17	4
51	17	8
52	18	5
53	23	11
54	113	32
55	63	22
56	84	18
57	12	3
58	12	3
59	277	113
60	78	3

At Bus	MW	MVAr
61	0	0
62	77	14
66	39	18
67	28	7
70	66	20
74	68	27
75	47	11
76	68	36
77	61	28
78	71	26
79	39	32
80	130	26
82	54	27
83	20	10
84	11	7
85	24	15
86	21	10
88	48	10
90	78	42
92	65	10
93	12	7

At Bus	MW	MVAr
94	30	16
95	42	31
96	38	15
97	15	9
98	34	8
100	37	18
101	22	15
102	5	3
103	23	16
104	38	25
105	31	26
106	43	16
107	28	12
108	2	1
109	8	3
110	39	30
112	25	13
114	8	3
115	22	7
117	20	8
118	33	15

Generator Data

BUS	Int. P (MW)	P-Min (MW)	P-Max (MW)	V (p.u.)	Operating Cost Coefficients				Ramp-Rate	
					a	b	c	d	Up (MW/Min)	Down (MW/Min)
1	0	0	250	0.955	NA					
4	0	0	300	0.998	NA					
6	0	0	150	0.990	NA					
8	0	0	200	1.015	NA					
10	150	50	500	1.050	0	0	2.217	22.173	20	24
12	85	30	300	0.990	0	0.001	11.628	116.279	15	18
15	0	0	150	0.970	NA					
18	0	0	200	0.973	NA					
19	10	6	60	0.962	0.0001	0.1	1000	10000	10	12
24	0	0	200	0.992	NA					
25	220	35	350	1.050	0	0	4.525	45.249	10	12
26	114	75	750	1.015	0	0	3.175	31.746	40	48
27	0	0	200	0.968	NA					
31	7	75	750	0.967	0.00001	0.013	1.2500	1250	50	60
32	0	0	200	0.963	NA					

BUS	Int. P (MW)	P-Min (MW)	P-Max (MW)	V (p.u.)	Operating Cost Coefficients				Ramp-Rate	
					a	b	c	d	Up (MW/Min)	Down (MW/Min)
34	0	0	200	0.984	NA					
36	10	6	60	0.980	0.0001	0.1	1000	10000	10	12
40	0	0	300	0.970	NA					
42	0	0	300	0.985	NA					
46	19	25	250	1.005	0.001	0.005	50	500	20	24
49	204	52.5	525	1.025	0	0	4.878	48.78	20	24
54	48	75	750	0.955	0	0.002	20.408	204.082	50	60
55	10	5.75	57.5	0.952	0.01	0.1	1000	10000	10	12
56	0	0	200	0.954	NA					
59	155	45	450	0.985	0	0.001	6.41	64.103	25	30
61	160	75	750	0.995	0	0.001	6.211	62.112	35	42
62	10	5	50	0.998	0.01	0.1	1000	10000	10	12
65	391	50	500	1.005	0	0	02.551	25.51	15	18
66	392	50	500	1.050	0	0	2.545	25.445	15	18
69	516.4	75	750	1.035	0	0	1.933	19.327	20	24
70	0	0	200	0.984	NA					
72	0	0	200	0.980	NA					
73	0	0	200	0.991	NA					
74	0	0	200	0.958	NA					
76	0	0	200	0.943	NA					
77	20	17.5	175	1.006	0.01	0.1	1000	10000	15	18
80	477	70	700	1.040	0	0	2.092	20.921	20	24
85	0	0	200	0.985	NA					
87	80	75	750	1.015	0.002	0.02	200	2000	50	60
89	607	75	750	1.005	0	0	1.645	16.447	15	18
90	0	0	200	0.985	NA					
91	0	0	200	0.980	NA					
92	0	0	200	0.990	NA					
99	0	0	200	1.010	NA					
100	252	38.75	387.5	1.017	0	0	3.953	39.526	15	18
103	40	10	100	1.010	0	0.002	24.39	243.902	10	12
104	0	5.75	57.5	0.971	0.01	0.1	1000	10000	10	12
105	0	0	200	0.965	NA					
107	0	0	200	0.952	NA					
110	0	0	200	0.973	NA					
111	36	0	50	0.980	0	0.003	27.027	270.27	10	12

BUS	Int. P (MW)	P-Min (MW)	P-Max (MW)	V (p.u.)	Operating Cost Coefficients				Ramp-Rate	
					a	b	c	d	Up (MW/Min)	Down (MW/Min)
112	0	0	200	0.975	NA					
113	0	0	200	0.993	NA					
116	0	0	200	1.005	NA					

Power Flow Results

Power Flow Result of Initial Condition

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
1	Riversde	0.955	-40.9	0	-11.5	51	25.8	0
2	Pokagon	0.972	-40.2	0	0	20	8.5	0
3	HickryCk	0.97	-40.2	0	0	39	9.4	0
4	NwCarlsl	0.998	-37	0	-67.4	30	12	0
5	Olive	1.006	-36.7	0	0	0	0	40.5
6	Kankakee	0.99	-38.8	0	6.6	52	21.8	0
7	JacksnRd	0.989	-39	0	0	19	2	0
8	Olive	1.015	-32.9	0	-202.6	0	0	0
9	Bequine	1.071	-30.7	0	0	0	0	0
10	Breed	1.05	-28.2	150	-213.5	0	0	0
11	SouthBnd	0.987	-38.8	0	0	70	22.4	0
12	TwinBrch	0.99	-39	85	64.6	47	9.9	0
13	Concord	0.972	-39.1	0	0	34	15.1	0
14	GoshenJt	0.985	-38.6	0	0	14	1	0
15	FtWayne	0.97	-35.7	0	-14.3	90	29.1	0
16	N.E.	0.987	-38.2	0	0	25	9.7	0
17	Sorenson	0.999	-33.9	0	0	11	3	0
18	McKinley	0.973	-35.4	0	17	60	33.1	0
19	Lincoln	0.962	-35.1	10	-24.6	45	24.1	0
20	Adams	0.964	-34.3	0	0	18	2.8	0
21	Jay	0.967	-32.7	0	0	14	7.5	0
22	Randolph	0.978	-30.2	0	0	10	4.8	0
23	CollCrnr	1.003	-25.2	0	0	7	3	0
24	Trenton	0.992	-22.1	0	-37.2	0	0	0
25	TannrsCk	1.05	-22.3	220	39.5	0	0	0
26	TannrsCk	1.015	-22.9	114	-62.7	0	0	0
27	Madison	0.968	-32.5	0	-16.7	62	12.6	0
28	Mullin	0.963	-34.1	0	0	17	6.5	0
29	Grant	0.964	-35	0	0	24	3.7	0
30	Sorenson	1.002	-29.6	0	0	0	0	0
31	DeerCrk	0.967	-34.8	7	23.2	43	26.1	0
32	Delaware	0.963	-32.6	0	-30	59	22.1	0
33	Haviland	0.972	-32.9	0	0	23	8.5	0

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
34	Rockhill	0.984	-28.3	0	-29.9	59	25.6	13.6
35	WestLima	0.981	-28.7	0	0	33	8.7	0
36	Sterling	0.98	-28.6	10	1.2	31	16.7	0
37	EastLima	0.992	-27.8	0	0	0	0	-24.6
38	EastLima	0.97	-23.9	0	0	0	0	0
39	NwLibrty	0.972	-27.5	0	0	27	10.4	0
40	WestEnd	0.97	-26.4	0	1.2	20	22.3	0
41	S.Tiffin	0.967	-25.9	0	0	37	9.4	0
42	Howard	0.985	-21.7	0	13.9	37	22.7	0
43	S.Kenton	0.966	-25.8	0	0	18	6.5	0
44	WMVernon	0.952	-19	0	0	16	7.3	-9.1
45	N.Newark	0.963	-15.7	0	0	53	20.4	-9.3
46	W.Lancst	1.005	-12.3	19	32.2	28	10	-10.1
47	Crooksvl	1.019	-9.5	0	0	34	0	0
48	Zanesvll	1.009	-10	0	0	20	11.2	-15.3
49	Philo	1.025	-9.1	204	111.3	87	30.7	0
50	WCambrdg	1.003	-11.1	0	0	17	4	0
51	Newcmrst	0.973	-13.6	0	0	17	7.6	0
52	SCoshoct	0.964	-14.5	0	0	18	4.6	0
53	Wooster	0.952	-15.3	0	0	23	10	0
54	Torrey	0.955	-14.2	48	-15.2	113	30.6	0
55	Wagenhls	0.952	-14.4	10	-3.1	63	20.9	0
56	Sunnysde	0.954	-14.3	0	-18	84	17.2	0
57	WNwPhil1	0.973	-13.3	0	0	12	2.8	0
58	WNwPhil2	0.963	-14.2	0	0	12	2.8	0
59	Tidd	0.985	-10.1	155	49.6	277	111.3	0
60	SWKammer	0.993	-6.2	0	0	78	3	0
61	W.Kammer	0.995	-5.3	160	-60.8	0	0	0
62	Natrium	0.998	-5.9	10	-8.8	77	14	0
63	Tidd	0.973	-6.7	0	0	0	0	0
64	Kammer	0.988	-4.9	0	0	0	0	0
65	Muskngum	1.005	-1.9	391	-4	0	0	0
66	Muskngum	1.05	-2.2	392	-10.3	39	18.9	0
67	Summerfl	1.021	-4.7	0	0	28	7.3	0
68	Sporn	1.006	-0.2	0	0	0	0	0
69	Sporn	1.035	0	329.4	-96.7	0	0	0
70	Portsmth	0.984	-9.4	0	18.2	66	19.7	0
71	NPortsmt	0.987	-10.6	0	0	0	0	0
72	Hillsbro	0.98	-16	0	-13.6	0	0	0
73	Sargents	0.991	-10.6	0	7.6	0	0	0
74	Bellefnt	0.958	-8.3	0	10	68	25.9	-11
75	SthPoint	0.969	-6.4	0	0	47	10.3	0
76	Darrah	0.943	-5.6	0	1.7	68	33.9	0
77	Turner	1.006	2.1	20	54.3	61	28.2	0
78	Chemical	1	2	0	0	71	26	0
79	CapitlHl	1	2.6	0	0	39	32	-20
80	CabinCrk	1.04	5.2	477	127.5	130	27	0
81	Kanawha	1.004	1.9	0	0	0	0	0

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
82	Logan	0.969	7.7	0	0	54	25.4	-18.8
83	Sprigg	0.963	10.9	0	0	20	9.3	-9.3
84	BetsyLne	0.972	16.4	0	0	11	6.6	0
85	BeaverCk	0.985	19.4	0	10.5	24	14.8	0
86	Hazard	0.992	23.7	0	0	21	9.8	0
87	Pinevlle	1.015	33.1	80	2.4	0	0	0
88	Fremont	0.988	22.8	0	0	48	9.8	0
89	ClinchRv	1.005	27.1	607	-18.7	0	0	0
90	Holston	0.985	23.3	0	21.6	78	41.4	0
91	HolstonT	0.98	22.1	0	-18	0	0	0
92	Saltvlle	0.99	20	0	-11.1	65	9.9	0
93	Tazewell	0.983	15.4	0	0	12	6.8	0
94	Switchbk	0.986	11.9	0	0	30	15.5	0
95	Caldwell	0.974	9.7	0	0	42	29.4	0
96	Baileysv	0.983	8.1	0	0	38	14.5	0
97	Sundial	1.007	6.3	0	0	15	9.1	0
98	Bradley	1.024	6.6	0	0	34	8.4	0
99	Hinton	1.01	10.5	0	-28.3	0	0	0
100	GlenLyn	1.017	12.4	252	80.8	37	18.3	0
101	Wythe	0.993	14.7	0	0	22	14.8	0
102	Smythe	0.99	18.2	0	0	5	2.9	0
103	Claytor	1.01	10.1	40	58.1	23	16.2	0
104	Hancock	0.971	8.2	10	-7.6	38	24.3	0
105	Roanoke	0.965	7.5	0	4.2	31	25.1	-18.6
106	Cloverdl	0.965	7	0	0	43	14.9	0
107	Reusens	0.952	5.7	0	3.5	28	11.4	-5.4
108	Blaine	0.968	7.1	0	0	2	0.9	0
109	Franklin	0.968	7	0	0	8	2.8	0
110	Fieldale	0.973	7	0	2.8	39	29.2	-5.7
111	DanRiver	0.98	8.7	36	-2.8	0	0	0
112	Danville	0.975	5.9	0	19.8	25	12.7	0
113	DeerCrk	0.993	-33.7	0	-11.9	0	0	0
114	WMedford	0.961	-33.1	0	0	8	2.8	0
115	Medford	0.961	-33.2	0	0	22	6.5	0
116	KygerCrk	1.005	-0.2	0	-39.8	0	0	0
117	Corey	0.977	-40.6	0	0	20	7.6	0
118	WHuntngd	0.951	-6.5	0	0	33	13.6	0

Power Flow Result of Crisp Constrained OPF

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
1	Riversde	0.955	-39	0	-11.9	51	25.8	0
2	Pokagon	0.972	-38.7	0	0	20	8.5	0
3	HickryCk	0.97	-38.1	0	0	39	9.4	0
4	NwCarlsl	0.998	-34.1	0	-75.4	30	12	0
5	Olive	1.006	-33.7	0	0	0	0	40.5
6	Kankakee	0.99	-36.7	0	6.6	52	21.8	0
7	JacksnRd	0.989	-37.2	0	0	19	2	0

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
8	Olive	1.015	-28.4	0	-151.3	0	0	0
9	Bequine	1.064	-21.4	0	0	0	0	0
10	Breed	1.05	-13.9	450	-186.1	0	0	0
11	SouthBnd	0.987	-37	0	0	70	22.4	0
12	TwinBrch	0.99	-37.8	30	79.9	47	9.9	0
13	Concord	0.972	-38	0	0	34	15.1	0
14	GoshenJt	0.985	-38	0	0	14	1	0
15	FtWayne	0.97	-36.9	0	-20.6	90	29.1	0
16	N.E.	0.988	-37.7	0	0	25	9.8	0
17	Sorenson	1.001	-35	0	0	11	3	0
18	McKinley	0.973	-36.7	0	14.9	60	33.1	0
19	Lincoln	0.962	-36.8	6	-25.9	45	24.1	0
20	Adams	0.965	-36.8	0	0	18	2.8	0
21	Jay	0.969	-35.9	0	0	14	7.5	0
22	Randolph	0.98	-34.1	0	0	10	4.8	0
23	CollCrnr	1.003	-30.3	0	0	7	3	0
24	Trenton	0.992	-26.4	0	-35.6	0	0	0
25	TannrsCk	1.05	-30.3	35	52.7	0	0	0
26	TannrsCk	1.015	-29.4	75	-65.3	0	0	0
27	Madison	0.968	-36	0	-21	62	12.6	0
28	Mullin	0.963	-36.4	0	0	17	6.5	0
29	Grant	0.964	-35.8	0	0	24	3.7	0
30	Sorenson	1.007	-30.7	0	0	0	0	0
31	DeerCrk	0.967	-35.1	75	2.3	43	26.1	0
32	Delaware	0.963	-35.4	0	-33.1	59	22.1	0
33	Haviland	0.974	-35.3	0	0	23	8.5	0
34	Rockhill	0.984	-32.1	0	-51.3	59	25.6	13.6
35	WestLima	0.981	-32.5	0	0	33	8.7	0
36	Sterling	0.98	-32.5	6	-0.3	31	16.7	0
37	EastLima	0.993	-31.6	0	0	0	0	-24.7
38	EastLima	0.978	-27.5	0	0	0	0	0
39	NwLibrty	0.973	-32.1	0	0	27	10.4	0
40	WestEnd	0.97	-31.5	0	-2.4	20	22.3	0
41	S.Tiffin	0.968	-31.4	0	0	37	9.4	0
42	Howard	0.985	-28.2	0	8.4	37	22.7	0
43	S.Kenton	0.97	-30.8	0	0	18	6.6	0
44	WMVernon	0.958	-26	0	0	16	7.3	-9.2
45	N.Newark	0.967	-23.4	0	0	53	20.6	-9.4
46	W.Lancst	1.005	-20	25	30.4	28	10	-10.1
47	Crooksvl	1.015	-17	0	0	34	0	0
48	Zanesvll	1.01	-18.8	0	0	20	11.2	-15.3
49	Philo	1.025	-18.1	52.5	170.2	87	30.7	0
50	WCambrdg	1.003	-20.3	0	0	17	4	0
51	Newcmrst	0.972	-23.2	0	0	17	7.6	0
52	SCoshoct	0.964	-24.2	0	0	18	4.6	0
53	Wooster	0.952	-25.2	0	0	23	10	0
54	Torrey	0.955	-24.2	75	-21.5	113	30.6	0
55	Wagenhls	0.952	-24.7	5.7	-1.7	63	20.9	0

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
56	Sunnysde	0.954	-24.5	0	-19	84	17.2	0
57	WNwPhil1	0.973	-23.1	0	0	12	2.8	0
58	WNwPhil2	0.963	-24	0	0	12	2.8	0
59	Tidd	0.985	-21.9	45	75.1	277	111.3	0
60	SWKammer	0.993	-17.3	0	0	78	3	0
61	W.Kammer	0.995	-16.5	75	-44.3	0	0	0
62	Natrium	0.998	-16.5	5	-3.7	77	14	0
63	Tidd	0.97	-17.4	0	0	0	0	0
64	Kammer	0.985	-15.1	0	0	0	0	0
65	Muskngum	1.005	-10	64.9	28.5	0	0	0
66	Muskngum	1.05	-10.1	500	-18.7	39	18.9	0
67	Summerfl	1.02	-13.8	0	0	28	7.3	0
68	Sporn	1.005	-5.1	0	0	0	0	0
69	Sporn	1.035	0	750	-101.4	0	0	0
70	Portsmth	0.984	-10.9	0	29.2	66	19.7	0
71	NPortsmt	0.987	-12.3	0	0	0	0	0
72	Hillsbro	0.98	-19	0	-10.8	0	0	0
73	Sargents	0.991	-12.3	0	8.3	0	0	0
74	Bellefnt	0.958	-9.5	0	11	68	25.9	-11
75	SthPoint	0.969	-7.6	0	0	47	10.3	0
76	Darrah	0.943	-7	0	1.4	68	33.9	0
77	Turner	1.006	0.3	17.5	48.5	61	28.2	0
78	Chemical	1	0.1	0	0	71	26	0
79	CapitlHl	1	0.7	0	0	39	32	-20
80	CabinCrk	1.04	3.2	699	103.1	130	27	0
81	Kanawha	1.003	-2	0	0	0	0	0
82	Logan	0.97	4.6	0	0	54	25.4	-18.8
83	Sprigg	0.962	8	0	0	20	9.3	-9.3
84	BetsyLne	0.971	13.9	0	0	11	6.6	0
85	BeaverCk	0.985	17	0	11.4	24	14.8	0
86	Hazard	0.992	21	0	0	21	9.8	0
87	Pinevlle	1.015	29.7	75	2.1	0	0	0
88	Fremont	0.988	20.9	0	0	48	9.8	0
89	ClinchRv	1.005	25.6	750	-28.3	0	0	0
90	Holston	0.985	21.1	0	22.4	78	41.4	0
91	HolstonT	0.98	19.2	0	-16.9	0	0	0
92	Saltvlle	0.99	15.9	0	26.4	65	9.9	0
93	Tazewell	0.981	10.1	0	0	12	6.7	0
94	Switchbk	0.985	5.5	0	0	30	15.5	0
95	Caldwell	0.975	4.3	0	0	42	29.5	0
96	Baileysv	0.984	3.9	0	0	38	14.5	0
97	Sundial	1.008	3.2	0	0	15	9.1	0
98	Bradley	1.026	1.4	0	0	34	8.4	0
99	Hinton	1.01	2.4	0	-31.1	0	0	0
100	GlenLyn	1.017	1.8	38.7	152.1	37	18.3	0
101	Wythe	0.988	6.8	0	0	22	14.7	0
102	Smythe	0.987	12.8	0	0	5	2.9	0
103	Claytor	1.01	-2.1	10	73.3	23	16.2	0

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
104	Hancock	0.971	-3.8	5.7	-5.9	38	24.3	0
105	Roanoke	0.965	-4.8	0	3.8	31	25.1	-18.6
106	Cloverdl	0.964	-4.9	0	0	43	14.9	0
107	Reusens	0.952	-6.4	0	3.7	28	11.4	-5.4
108	Blaine	0.967	-6	0	0	2	0.9	0
109	Franklin	0.968	-6.4	0	0	8	2.8	0
110	Fieldale	0.973	-7.3	0	4	39	29.2	-5.7
111	DanRiver	0.98	-7.4	0	7.2	0	0	0
112	Danville	0.975	-8.4	0	19.8	25	12.7	0
113	DeerCrk	0.993	-35	0	-16.2	0	0	0
114	WMedford	0.961	-36.3	0	0	8	2.8	0
115	Medford	0.961	-36.3	0	0	22	6.5	0
116	KygerCrk	1.005	-5.1	0	-28.5	0	0	0
117	Corey	0.977	-39.3	0	0	20	7.6	0
118	WHuntngd	0.951	-7.8	0	0	33	13.6	0

Power Flow Result of FCOPF

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
1	Riversde	0.99	-35.4	0	-9.6	51	26.7	0
2	Pokagon	1.007	-35.1	0	0	20	9.1	0
3	HickryCk	1.003	-34.6	0	0	39	10.1	0
4	NwCarlsl	1.033	-30.8	0	10.3	30	12.4	0
5	Olive	1.035	-30.3	0	0	0	0	42.8
6	Kankakee	1.025	-33.2	0	18.9	52	22.5	0
7	JacksnRd	1.024	-33.7	0	0	19	2.1	0
8	Olive	1.05	-25.1	0	-329.3	0	0	0
9	Bequine	1.1	-18.4	0	0	0	0	0
10	Breed	1.085	-11.1	465	-203.5	0	0	0
11	SouthBnd	1.021	-33.5	0	0	70	24	0
12	TwinBrch	1.025	-34.3	30	89.7	47	10.2	0
13	Concord	1.007	-34.5	0	0	34	16.2	0
14	GoshenJt	1.021	-34.5	0	0	14	1	0
15	FtWayne	1.005	-33.6	0	-14.1	90	30.1	0
16	N.E.	1.021	-34.2	0	0	25	10.4	0
17	Sorenson	1.032	-31.8	0	0	11	3.2	0
18	McKinley	1.008	-33.5	0	22.4	60	34.3	0
19	Lincoln	0.997	-33.5	6	-28.5	45	24.9	0
20	Adams	1.001	-33.6	0	0	18	3	0
21	Jay	1.005	-32.7	0	0	14	8.1	0
22	Randolph	1.016	-31	0	0	10	5.2	0
23	CollCrnr	1.039	-27.5	0	0	7	3.2	0
24	Trenton	1.027	-24	0	-40.4	0	0	0
25	TannrsCk	1.085	-27.4	35	157.4	0	0	0
26	TannrsCk	1.05	-26.4	75	-198.3	0	0	0
27	Madison	1.003	-32.8	0	-23.5	62	13	0
28	Mullin	0.998	-33.1	0	0	17	7	0

งานเอกสารและสิ่งพิมพ์

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
29	Grant	0.999	-32.6	0	0	24	4	0
30	Sorenson	1.062	-27.6	0	0	0	0	0
31	DeerCrk	1.002	-31.9	75	4.7	43	27.1	0
32	Delaware	0.998	-32.2	0	-36.8	59	23	0
33	Haviland	1.009	-32.3	0	0	23	9.2	0
34	Rockhill	1.019	-29.4	0	-41.9	59	26.5	14.5
35	WestLima	1.016	-29.8	0	0	33	9.3	0
36	Sterling	1.015	-29.8	6	1.4	31	17.3	0
37	EastLima	1.027	-29	0	0	0	0	-26.4
38	EastLima	1.041	-25.1	0	0	0	0	0
39	NwLibrty	1.007	-29.6	0	0	27	11.2	0
40	WestEnd	1.005	-29.1	0	-2.1	20	23.1	0
41	S.Tiffin	1.003	-29	0	0	37	10.1	0
42	Howard	1.02	-26.2	0	5.8	37	23.5	0
43	S.Kenton	1.006	-28.4	0	0	18	7.1	0
44	WMVernon	0.994	-24.3	0	0	16	7.9	-9.9
45	N.Newark	1.003	-22	0	0	53	22.1	-10.1
46	W.Lancst	1.04	-18.9	25	29.7	28	10.4	-10.8
47	Crooksvl	1.05	-16.2	0	0	34	0	0
48	Zanesvll	1.045	-17.9	0	0	20	12	-16.4
49	Philo	1.06	-17.3	52.5	169.9	87	31.8	0
50	WCambrdg	1.038	-19.3	0	0	17	4.3	0
51	Newcmrst	1.008	-21.9	0	0	17	8.1	0
52	SCoshoct	0.999	-22.9	0	0	18	5	0
53	Wooster	0.987	-23.8	0	0	23	10.7	0
54	Torrey	0.99	-22.9	75	-24.4	113	31.7	0
55	Wagenhls	0.987	-23.3	5.7	-2.7	63	21.7	0
56	Sunnysde	0.989	-23.1	0	-22.3	84	17.8	0
57	WNwPhil1	1.008	-21.9	0	0	12	3.1	0
58	WNwPhil2	0.999	-22.7	0	0	12	3	0
59	Tidd	1.02	-20.7	45	93.7	277	115.3	0
60	SWKammer	1.029	-16.5	0	0	78	3.2	0
61	W.Kammer	1.03	-15.7	75	1.1	0	0	0
62	Natrium	1.033	-15.8	5	-4.2	77	14.5	0
63	Tidd	1.033	-16.5	0	0	0	0	0
64	Kammer	1.043	-14.4	0	0	0	0	0
65	Muskngum	1.04	-9.6	76	-236.7	0	0	0
66	Muskngum	1.083	-10	458	79.6	-39	19.5	0
67	Summerfl	1.054	-13.4	0	0	28	7.8	0
68	Sporn	1.046	-5	0	0	0	0	0
69	Sporn	1.07	0	750	-15.1	0	0	0
70	Portsmth	1.019	-9.9	0	22.9	66	20.4	0
71	NPortsmt	1.022	-11.2	0	0	0	0	0
72	Hillsbro	1.015	-17.3	0	-12.9	0	0	0
73	Sargents	1.026	-11.2	0	8.1	0	0	0
74	Bellefnt	0.993	-8.7	0	9.4	68	26.8	-11.8
75	SthPoint	1.004	-6.9	0	0	47	11.1	0
76	Darrah	0.978	-6.4	0	-0.6	68	35.2	0

BUS	NAME	|V|	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
77	Turner	1.041	0.3	17.5	46.3	61	29.1	0
78	Chemical	1.035	0.2	0	0	71	27.9	0
79	CapitlHl	1.034	0.7	0	0	39	34.2	-21.4
80	CabinCrk	1.075	3	700	164.1	130	27.9	0
81	Kanawha	1.056	-2.1	0	0	0	0	0
82	Logan	1.005	4.4	0	0	54	27.3	-20.2
83	Sprigg	0.998	7.6	0	0	20	10	-10
84	BetsyLne	1.007	13.1	0	0	11	7.1	0
85	BeaverCk	1.02	16	0	7.9	24	15.3	0
86	Hazard	1.027	19.7	0	0	21	10.6	0
87	Pineville	1.05	27.9	75	1.6	0	0	0
88	Fremont	1.023	19.7	0	0	48	10.5	0
89	ClinchRv	1.04	24	750	-30.9	0	0	0
90	Holston	1.02	19.9	0	21.4	78	42.8	0
91	HolstonT	1.015	18.1	0	-17.8	0	0	0
92	Saltville	1.025	15	0	17.7	65	10.2	0
93	Tazewell	1.016	9.5	0	0	12	7.2	0
94	Switchbk	1.021	5.2	0	0	30	16.7	0
95	Caldwell	1.01	4.1	0	0	42	31.6	0
96	Baileysv	1.02	3.7	0	0	38	15.6	0
97	Sundial	1.043	3	0	0	15	9.8	0
98	Bradley	1.061	1.4	0	0	34	9	0
99	Hinton	1.045	2.3	0	-32.5	0	0	0
100	GlenLyn	1.052	1.8	38.7	163.5	37	18.9	0
101	Wythe	1.024	6.5	0	0	22	15.7	0
102	Smythe	1.022	12.1	0	0	5	3.1	0
103	Claytor	1.039	-1.7	10	50.7	23	16.6	0
104	Hancock	1.006	-3.4	5.7	-3.2	38	25.1	0
105	Roanoke	1	-4.3	0	6.9	31	26	-20
106	Cloverdl	0.999	-4.5	0	0	43	16	0
107	Reusens	0.987	-5.8	0	3.3	28	11.8	-5.8
108	Blaine	1.002	-5.4	0	0	2	1	0
109	Franklin	1.003	-5.9	0	0	8	3	0
110	Fieldale	1.008	-6.6	0	6.6	39	30.2	-6.1
111	DanRiver	1.015	-6.8	0	7.4	0	0	0
112	Danville	1.01	-7.7	0	19.9	25	13.1	0
113	DeerCrk	1.028	-31.8	0	-4	0	0	0
114	WMedford	0.996	-33	0	0	- 8	3	0
115	Medford	0.996	-33.1	0	0	22	6.9	0
116	KygerCrk	1.04	-4.9	0	-167.4	0	0	0
117	Corey	1.012	-35.7	0	0	20	8.2	0
118	WHuntngd	0.986	-7.1	0	0	33	14.6	0

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นายกีรติ ชยะกุลคีรี

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 25 กันยายน 2515

สถานที่เกิด อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์

สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 11/108 ซอยพหลโยธิน 48 ถนนพหลโยธิน

แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 12120

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถานที่ทำงานปัจจุบัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2538 วศ.บ. จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542 M.Eng จาก Asian Institute of Technology

พ.ศ. 2547 D.Eng จาก Asian Institute of Technology

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยศรีปทุม
T116747