



มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานวิจัย

เรื่อง

การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดในระบบ
ไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่
เหมาะสมที่สุด

OPTIMAL POWER FLOW SOLUTION FOR POWER SYSTEM
WITH NON-SMOOTH GENERATING COST FUNCTION
USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

กীরติ ชยะกุลคีรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีการศึกษา 2549



มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานวิจัย

เรื่อง

การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดในระบบ
ไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่
เหมาะสมที่สุด

OPTIMAL POWER FLOW SOLUTION FOR POWER SYSTEM
WITH NON-SMOOTH GENERATING COST FUNCTION
USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

กิริติ ชยะกุลศิริ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2549

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณทั้งหมด และได้ให้เวลาในการทำโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ดร.ชาย ชมภูอินไหว ผู้ทรงคุณวุฒิที่ปรึกษา งานวิจัย ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงตลอดการดำเนินงานและการเขียนรายงานวิจัยนี้

หัวข้อวิจัย : การหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดในระบบไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด

ผู้วิจัย : นายกิริติ ชยะกุลศิริ

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Optimal Power Flow) โดยวิธีการคำนวณร่วมระหว่างวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด particle swarm optimization (PSO) และโปรแกรมเชิงเส้น quadratic programming (QP) หรือ PSO-QP โดยมีการพิจารณาถึงข้อจำกัดของสายส่งไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และข้อจำกัดช่วงกำลังการผลิตที่ไม่ต่อเนื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Prohibited Zone) โดยวิธีการ PSO-QP ได้มีการทดสอบกับระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE และระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE โดยจากการทดสอบการคำนวณพบว่าวิธีการ PSO-QP มีแนวโน้มที่จะพบเงื่อนไขการทำงานที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดมากกว่าวิธีการ PSO

คำสำคัญ : การหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าเอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด วิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด โปรแกรมเชิงเส้น ช่วงกำลังการผลิตที่ไม่ต่อเนื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Research Title : Optimal Power Flow Solution for Power System with Non-Smooth
Generating Cost Function Using Particle Swarm Optimization

Name of Researcher : Mr. Kcerati Chayakulkheere

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

Year of Publication : B.E. 2550

ABSTRACT

This research investigates a hybrid particle swarm optimization (PSO) and quadratic programming (QP) algorithm for optimal power flow (OPF) with transmission line limit and transformer loading and generator prohibited operating zones constraints. In the proposed PSO-QP-OPF algorithm, the sets of real power generation at generator bus are used as particles in the PSO. The quadratic programming OPF with transmission line limit and transformer loading constrained is performed every generation to obtain the best solution of each population search. The proposed PSO-QP-OPF is tested with the IEEE 30 bus and 118 bus systems and compared to the PSO-OPF. The proposed PSO-QP-OPF results in more probability to obtain global minimum total system operating cost in the constrained OPF than the PSOED considering generator prohibited operating zones constraints.

Keywords : optimal power flow, particle swarm optimization, quadratic programming, generator prohibit operating zone

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..... 7
3	ระเบียบวิธีวิจัย 8
3.1	การวางหลักวิธีในการหาคำตอบ (PROBLEM FORMULATION)..... 8
3.2	กระบวนการคำนวณ (COMPUTATIONAL PROCEDURE)..... 9
4	ผลการทดสอบวิธีการ..... 13
4.1	การทดสอบวิธีการกับระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส..... 13
4.2	การทดสอบวิธีการกับระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส..... 16
5	สรุป..... 19

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม	20
ภาคผนวก.....	23
ภาคผนวก ก. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส	25
ภาคผนวก ข. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส	29
ประวัติของผู้วิจัย	40

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตและช่วงกำลังงานที่ไม่สามารถทำงานได้ของระบบไฟฟ้า มาตรฐาน 30 บัซของ IEEE.....	14
ตารางที่ 4.2 ผลการหาคำตอบในระบบมาตรฐาน 30 บัซของ IEEE	14
ตารางที่ 4.3 ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตและช่วงกำลังงานที่ไม่สามารถทำงานได้ของระบบไฟฟ้า มาตรฐาน 30 บัซของ IEEE.....	17

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 4.1 ระบบมาตรฐาน 30 บั๊สของ IEEE	13
ภาพที่ 4.2 การลู่เข้าของวิธี PSO และ PSO-QP จากการทดสอบกับระบบ มาตรฐาน 30 บั๊สของ IEEE.....	15
ภาพที่ 4.3 คำตอบของวิธี PSO และ PSO-QP จากการทดสอบกับระบบ มาตรฐาน 30 บั๊สของ IEEE รวม 50 ครั้ง	15
ภาพที่ 4.4 การลู่เข้าของวิธี PSO-QP จากการทดสอบกับระบบ มาตรฐาน 118 บั๊สของ IEEE.....	18
ภาพที่ 4.5 คำตอบของวิธี PSO-QP จากการทดสอบกับระบบ มาตรฐาน 118 บั๊สของ IEEE รวม 20 ครั้ง	18
ภาพที่ ก.1 ระบบมาตรฐาน 30 บั๊สของ IEEE.....	25
ภาพที่ ข.1 ระบบมาตรฐาน 118 บั๊สของ IEEE.....	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิธีการหาคำตอบของปัญหาการควบคุมการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Optimal power flow, OPF) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยใช้วิธีการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงการพิจารณาข้อจำกัดของระบบที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ในการทำงาน อย่างไรก็ตาม วิธีการหาคำตอบ OPF ที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นการหาคำตอบที่อยู่บนพื้นฐานของการประมาณค่าความสัมพันธ์ของต้นทุนในการผลิตกับกำลังงานจริงในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator operating cost function) โดยประมาณเป็นฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง (Quadratic cost function) หรือประมาณเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear cost function) และถือว่าฟังก์ชันต้นทุนการผลิตเป็นแบบเพิ่มขึ้นตามกำลังงานไฟฟ้าจริงที่ผลิตเพิ่มขึ้น (Monotonically increasing cost function) แต่ในความเป็นจริงแล้ว การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเฉพาะในปัจจุบันไม่ได้มีฟังก์ชันต้นทุนในการผลิตในรูปแบบดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีผลของการเปิดและปิดของวาล์วในกรณีที่เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Wood and Wallenberg, 1996; G. Zwe-Lee, 2003) ทำให้มีความไม่ต่อเนื่องของฟังก์ชันต้นทุนในการผลิต (Discontinuous cost function) มีช่วงที่โรงไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ (Prohibited operating zones) การที่จะหาคำตอบโดยคำนึงถึงฟังก์ชันต้นทุนที่ไม่เพิ่มขึ้นตามกำลังการผลิต และมีช่วงที่โรงไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้นั้น จะต้องใช้กระบวนการหาคำตอบโดยวิธีการคำนวณเชิงปัญญาประดิษฐ์

ทั้งนี้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีผู้เสนอไว้มีหลายวิธี เช่น กระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA), โปรแกรมวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming, EP), การค้นหาแบบทาบู (Tabu Search, TS) และการหาคำตอบแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle Swarm Optimization, PSO) ซึ่งวิธีการ PSO เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นล่าสุดและมีแนวโน้มจะให้คำตอบได้ในระยะเวลาคำนวณที่สั้นกว่าวิธีอื่น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ

- เพื่อพัฒนาวิธีการการหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด (Optimal Power Flow, OPF) ในระบบไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตไม่ต่อเนื่อง ด้วยวิธีหาค่าตอบแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle Swarm Optimization, PSO) โดยคำนวณร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้น (Quadratic Programming, QP)
- เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณวิธีการ PSO และ PSO-QP

1.3 คำถามการวิจัย

วิธีการหาค่าตอบการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดจะสามารถแก้ปัญหา OPF ในระบบไฟฟ้ากำลังได้โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใดและจะมีข้อดีและข้อจำกัดอะไรบ้างเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ได้มีการเสนอไว้แล้ว

1.4 สมมุติฐานการวิจัย

วิธีการหาค่าตอบการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดที่เสนอในงานวิจัยจะสามารถใช้หาค่าตอบของ OPF ในระบบไฟฟ้า ได้โดยมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบของปัญหา OPF ได้ดี โดยเฉพาะในกรณีที่ฟังก์ชันต้นทุนในการผลิตมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ต่อเนื่อง

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

กลุ่มเป้าหมาย หรือประชากร

ทดสอบวิธีการกับระบบมาตรฐาน 30 บัส และ 118 บัส ของ The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) โดยข้อมูลประกอบด้วย

- ระบบไฟฟ้า 30 บัส โดยกำหนดค่าฟังก์ชันต้นทุนการผลิตที่ไม่ต่อเนื่อง
- ระบบไฟฟ้า 118 บัส โดยกำหนดค่าฟังก์ชันต้นทุนการผลิตที่ไม่ต่อเนื่อง

- เนื้อหาของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการการหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด (Optimal Power Flow, OPF) ในระบบไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตไม่ต่อเนื่อง ด้วยวิธีหาค่าตอบแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle Swarm Optimization, PSO) โดยค่าพิกัดกำลังของสายส่งไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า ช่วงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะถูกนำมาพิจารณาในกระบวนการหาค่าตอบที่นำเสนอ ทั้งนี้เขตของ

ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าปรับตั้งเทปของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกใช้เป็นตัวแปรในการหาคำตอบของ PSO-QP วิธีที่นำเสนอจะทดสอบด้วยระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE

- ระยะเวลา

1 ปี

1.6 นิยามศัพท์

การไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Optimal Power Flow (OPF)) วิธีการวิเคราะห์เพื่อหาเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง โดยมีตัวแปรคือ กำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การปรับเทปของหม้อแปลง และมีข้อจำกัดคือพิกัดกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่บัสและพิกัดกำลังงานของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งขึ้นอยู่กับเป้าหมายในการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า โดยมีเป้าหมายหลักคือต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด

การหาคำตอบการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle Swarm Optimization) วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในการหาคำตอบที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยเป็นกระบวนการที่เลียนแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาคและสิ่งมีชีวิตที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม

ฟังก์ชันต้นทุนในการผลิตที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous cost function) ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าที่มีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน เกิดจากการทำงานของโรงไฟฟ้าที่มีการควบคุมวาล์วเป็นช่วง

ช่วงกำลังงานที่โรงไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ (Prohibited operating zones) ช่วงกำลังงานไฟฟ้าจริงของโรงไฟฟ้าที่ไม่สามารถสั่งให้ทำงานได้เนื่องจากคุณลักษณะของโรงไฟฟ้าที่มีการควบคุมวาล์วเป็นช่วง

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย

การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Optimal Power Flow, OPF) เป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่สำคัญในการบริหารจัดการระบบไฟฟ้ากำลังให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด วัตถุประสงค์พื้นฐานของ OPF คือให้ได้รับความพอใจจากการที่มีต้นทุนการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด โดยมีข้อจำกัดของสมดุลกำลังไฟฟ้า ในปัจจุบัน OPF ได้ถูกพัฒนาให้สามารถคำนึงถึงข้อจำกัดของระบบไฟฟ้าหลายอย่าง และโดยทั่วไปต้นทุนการผลิตในแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยฟังก์ชันของกำลังงานไฟฟ้าที่เป็นสมการยกกำลังสองและแก้ปัญหาโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เช่น gradient method, linear programming, quadratic programming

โดยทั่วไปปัญหา OPF จะเป็นการสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด โดยมีข้อจำกัดทั้งแบบเท่ากัน (Equality Constraints) และไม่เท่ากัน (Inequality Constraints) อันประกอบด้วย สมการสมดุลของกำลังงานไฟฟ้าจริง (real power balance) นั่นคือ ผลรวมของกำลังงานไฟฟ้าจริงที่ผลิตทั้งหมดเท่ากับผลรวมของกำลังงานไฟฟ้าจริงภาระบวกกับกำลังงานไฟฟ้าจริงที่สูญเสียของระบบ นอกจากนี้เมื่อเราพิจารณาสมการการไหลของกำลังงานไฟฟ้าในระบบ จะทำให้สามารถหาค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้าย่อยหรือที่บัส (Bus) และค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าได้ ซึ่งทำให้การหาคำตอบ OPF สามารถรวมเอาข้อจำกัดขนาดของแรงดันที่บัส และกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ สายส่งไฟฟ้าเข้าไปในปัญหาได้ นอกจากนี้ การหาคำตอบ OPF ยังสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบที่สามารถควบคุมได้ (Control variables) อื่น ๆ เช่น แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Terminal Voltage), เทปของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Tap Setting) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามตัวแปรของระบบไฟฟ้ากำลังในความเป็นจริงจะมีลักษณะของต้นทุนที่ไม่ต่อเนื่องจากการเปิดปิดวาล์วและจากผลกระทบของเชื้อเพลิง ซึ่งหากละเอียดถี่ถ้วนนี้จะทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้

สำหรับปัญหาพื้นฐานของ OPF ที่คำนึงถึงผลของการเปิดปิดวาล์วและผลกระทบของเชื้อเพลิงนั้นจะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งจะต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการหาคำตอบแบบไม่ต่อเนื่อง (non-smooth optimization) หรือแบบ Stochastic Optimization เช่น กระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA), โปรแกรมวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming, EP), การค้นหาแบบทาบู (Tabu Search, TS) และ การเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle swarm optimization, PSO) PSO เป็นหนึ่งในวิธีการใหม่ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการหาคำตอบ

การไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจาก PSO สามารถประยุกต์ใช้แก้ปัญหาแบบ ไม่เชิงเส้นและแบบ ไม่ต่อเนื่องได้ดี

สำหรับวิธีการหาคำตอบด้วย PSO นั้นเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ต่อเนื่องได้ (J. Kennedy and R. Eberhart, 1995) โดยได้ถูกพัฒนาจากกระบวนการอยู่ร่วมกันทางสังคมเช่น การเคลื่อนของนกหรือปลาในฝูง และมีวิธีการค้นหาคำตอบที่คล้ายคลึงกับวิธีการทาง stochastic อื่น คือมีการเริ่มต้นกระบวนการที่เป็นแบบสุ่ม

กระบวนการค้นหาคำตอบแบบ PSO มีลักษณะที่เอื้อให้มีความยืดหยุ่นสูงในการหาคำตอบให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของทั้งหมด (global optimum) และเป็นกระบวนการหาคำตอบแบบ stochastic ที่มีประสิทธิภาพและประยุกต์ใช้งานง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์อื่น นอกจากนี้ PSO ยังมีความสามารถในการค้นหาที่ครอบคลุมทั้งหมด (Global Search) ในช่วงแรกของการค้นหาและมีการค้นหาที่มุ่งเน้นเฉพาะพื้นที่ (Local Search) ในช่วงท้ายของการค้นหา ดังนั้นในการหาคำตอบที่มีค่าตอบเฉพาะพื้นที่ (Local) หลายจุดนั้น PSO จะมีแนวโน้มที่สามารถค้นหาคำตอบได้ครอบคลุมทุกคำตอบเฉพาะพื้นที่ได้ในช่วงท้ายของการค้นหา

2.2 ทฤษฎีที่รองรับเรื่องที่วิจัย

ปัญหา OPF เป็นการสร้างสมการคณิตศาสตร์ขนาดใหญ่ และซับซ้อน ซึ่งต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยคำนวณ โดยสามารถเขียนแสดงสมการที่ใช้ในการหาคำตอบได้เป็น

$$\text{หาค่าต่ำสุดของ} \quad TF = \sum_{i \in BG} F(P_{Gi}) \quad (2.1)$$

$$\text{โดยที่} \quad \sum_{i \in BG} P_{Gi} = P_{load} + P_{loss} \quad (2.2)$$

$$|V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max}, i = 1, \dots, NB \quad (2.3)$$

$$|f_i| \leq |f_i|^{\max}, i = 1, \dots, NL \quad (2.4)$$

เมื่อ

TF เป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าทั้งหมด (บาทต่อชั่วโมง)

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

BG เป็นเซตของบัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{Gi} เป็นกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

- P_{tot} เป็นกำลังงานไฟฟ้าจริงของภาระทั้งหมด (MW)
- P_{loss} เป็นกำลังงานไฟฟ้าจริงที่สูญเสียทั้งหมด (MW)
- $|V_i|^{\text{min}}$ เป็นขอบเขตของขนาดของแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส i (V)
- $|V_i|$ เป็นขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (V)
- $|V_i|^{\text{max}}$ เป็นขอบเขตของขนาดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่บัส i (V)
- NB เป็นจำนวนบัสทั้งหมด
- $|f_i|$ เป็นขนาดของกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลง i (MVA)
- $|f_i|^{\text{max}}$ เป็นขอบเขตสูงสุดของขนาดของกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลง i (MVA)
- NL เป็นจำนวนสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมด

ทั้งนี้ ได้มีการวิจัยและพัฒนากระบวนการคำนวณและ โปรแกรมคอมพิวเตอร์กันมาอย่างต่อเนื่อง หลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีมีข้อดี – ข้อเสีย แตกต่างกันไป เช่น

- วิธี Lambda Iteration: วิธีการนี้สามารถพิจารณากำลังงานไฟฟ้าจริงที่สูญเสียได้ในรูปของเมตริกซ์ที่เรียกว่า B-matrix หรือใช้ตัวประกอบชดเชย (Penalty Factor) วิธีการนี้ได้รับการใช้งานแพร่หลายใน โปรแกรม ED มาตรฐาน
- วิธี Gradient: วิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณมากและการแก้ปัญหาที่มีข้อจำกัดเป็นอสมการ (Inequality Constraint) ทำได้ไม่สะดวก
- วิธีการ Newton: วิธีการนี้ให้คำตอบที่เร็วแต่ก็ยังคงมีความยากลำบากในการพิจารณาปัญหาที่มีข้อจำกัดเป็นอสมการเช่นกัน
- วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP): วิธีการ LP สามารถใช้กับปัญหาที่มีข้อจำกัดเป็นอสมการได้ดี ทำให้ได้รับการใช้งานแพร่หลาย โดยการพิจารณาปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะนิยมใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ก่อน
- วิธีการ Quadratic Programming (QP): วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถใช้กับปัญหาที่มีสมการวัตถุประสงค์เป็นสมการตัวแปรยกกำลังสอง และรองรับปัญหาที่มีข้อจำกัดที่เป็นอสมการเชิงเส้นได้
- วิธีการ Interior Point (IP): วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถรองรับปัญหาที่มีข้อจำกัดที่เป็นอสมการได้ดี แลใช้เวลาในการคำนวณต่ำ
- วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งมีการพัฒนาขึ้นและอยู่ในระหว่างการพัฒนาหลายวิธี

วิธีการหาค่าตอบโดยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสม (Particle Swarm Optimization, PSO) (J. Kennedy and R. Eberhart, 1995) เป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการหาค่าตอบที่เหมาะสมของปัญหาต่าง ๆ และได้รับความสนใจอย่างมากในการประยุกต์ใช้ในการหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ในระบบวิธีของ PSO จะพิจารณาให้อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ในอาณาบริเวณหลายมิติที่ค้นหาและในการเคลื่อนตัวแต่ละครั้งอนุภาคจะใช้ประสบการณ์เดิมและประสบการณ์จากอนุภาคอื่นในการเคลื่อนตัวไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมมากขึ้น ทิศทางในการเคลื่อนตัวจะพิจารณาจากอนุภาคและประสบการณ์ที่ผ่านมา

2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

วิธีการหาค่าตอบของปัญหา OPF ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และได้มีการนำเอาวิธีการหาค่าตอบในแบบต่าง 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; D. Srinivasan and G.B. Sheble, 1993), โปรแกรมวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming, EP) (Lin et al, 2001; Attaviriyapap et al, 2002; Yang et al, 1996; Yuryevich and Wong, 1999), การค้นหาแบบทาบู (Tabu Search, TS) (Lin et al, 2002; Lin et al 2001)

ใน (G. Zue-Lee, 1993) วิธีการ PSO แบบปรับปรุงได้ถูกประยุกต์ใช้ในการหาค่าตอบการส่งเงินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด โดยมีข้อจำกัดแบบเท่ากัน (Equality constraints) และแบบไม่เท่ากัน (Inequality constraints) สำหรับการหาค่าตอบส่งเงินเครื่องโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดในกรณีที่โรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตไม่ต่อเนื่องและเป็นฟังก์ชันที่ไม่ราบเรียบก็ได้ถูกเสนอโดย (Park et al, 2000) อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะต้องใช้การค้นหาที่มีข้อมูลจำนวนมากเพื่อที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด จึงได้มีการเสนอการหาค่าตอบที่ใช้วิธีการร่วมกันของ PSO และโปรแกรมควอดราติก (Quadratic programming) โดย (Victoirea and Jeyakumarb, 2004; Victoirea and Jeyakumarb, 2005) อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอยังไม่ได้รวมข้อจำกัดพิกัดกำลังของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การวางหลักวิธีในการหาคำตอบ (Problem Formulation)

วิธีการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เอื้อให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle Swarm Optimization Optimal Power Flow, PSO-OPF) จะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ให้มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด โดยมีข้อจำกัดของสมดุลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังงานรีแอกทีฟ พิกัดของสายส่งไฟฟ้า โดยสามารถแสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$\text{หาค่าต่ำสุดของ} \quad FC = \sum_{i \in BG} F(P_{Gi}), \quad (3.1)$$

โดยที่เป็นไปตามข้อจำกัดของสมการสมดุลกำลังงานไฟฟ้า

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i = 1, \dots, NB, \quad (3.2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = -\sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i = 1, \dots, NB, \quad (3.3)$$

และข้อจำกัดพิกัดของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ

$$|f_l| \leq f_l^{\max}, \text{ for } l = 1, \dots, NL, \quad (3.4)$$

และข้อจำกัดขอบเขตการทำงานและช่วงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{Gi}^{l,j} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{u,j}, i \in BG, j = 1, \dots, NZ_p, \quad (3.5)$$

$$P_{Gi}^{l,1} = P_{Gi}^{\min}, \quad (3.6)$$

$$P_{Gi}^{u,NZ_i} = P_{Gi}^{\max}, \quad (3.7)$$

เมื่อ

FC คือต้นทุนการผลิตทั้งหมดของระบบไฟฟ้า (บาทต่อชั่วโมง)

$F(P_{Gi})$ คือต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่บัส i (บาทต่อชั่วโมง)

- P_{Gi} คือกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่บัส i (MW)
- P_{Di} คือภาระกำลังงานไฟฟ้าจริงที่บัส i (MW)
- $|V_i|$ คือขนาดของแรงดันที่บัส i (V)
- BG คือเซตของบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่
- f_l^{\max} คือพิกัดกำลังงานไฟฟ้าของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่ l (MVA)
- NB คือจำนวนบัสทั้งหมด
- P_{Gi}^{\max} คือกำลังงานไฟฟ้าจริงสูงสุด (พิกัด) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่บัส i (MW)
- P_{Gi}^{\min} คือกำลังงานไฟฟ้าจริงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่บัส i (MW)
- Q_{Di} คือภาระกำลังงานไฟฟ้ารีแอกติฟที่บัส i (MVAR)
- $|y_{ij}|$ คือขนาดของ y_{ij} ในเมตริก Y_{bus} (mho)
- θ_{ij} คือมุมของ y_{ij} ในเมตริก Y_{bus} (radian)
- f_l คือกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า l (MVA)
- Q_{Gi} คือค่ากำลังงานไฟฟ้ารีแอกติฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MVAR)
- δ_{ij} คือผลต่างระหว่างมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i และบัส j (radian)
- $P_{Gi}^{l,j}$ และ $P_{Gi}^{n,j}$ คือขอบเขตในช่วงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้

ทั้งนี้กำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละบัส (P_{Gi} , $i \in BG$) จะเป็นคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการที่นำเสนอ

3.2 กระบวนการคำนวณ (Computational Procedure)

ในการประยุกต์ใช้ PSO ในการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมหรือที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดจะสามารถเขียนแสดงเซตของอนุภาคได้เป็นเซตของกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เป็น

$$P_{Gi} = [P_{Gi}^1, P_{Gi}^2, \dots, P_{Gi}^M] \quad (3.8)$$

$$P_{Gi}^i = [P_{G1}^j, P_{G2}^j, \dots, P_{G,NG}^j]^T \quad (3.9)$$

เมื่อ P_{Gi} เป็นเมตริกซ์แสดงค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละครั้งของการค้นหา P_{Gi}^j เป็นเมตริกซ์ย่อยแสดงชุดของตำแหน่งเดิมของอนุภาค j ซึ่งเป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่บัส i (P_{Gi}^j) ในแต่ละอนุภาคจะถูกใช้ในการทดสอบโดยการหาคำตอบ

การไหลของกำลังงานไฟฟ้าและจำนวนต้นทุนการผลิตจากนั้นจะทำการบันทึกค่าคำตอบที่ดีที่สุดไว้เป็น

$$pbest = [pbest_1, pbest_2, \dots, pbest_{NG}]^T \quad (3.10)$$

กรณีค่าที่ดีที่สุดของอนุภาคในกลุ่มจะแทนด้วย $gbest'$ และค่าอัตราความเร็วของอนุภาค j จะแสดงเป็น

$$u^j = [u_1^j, u_2^j, \dots, u_{NG}^j]^T \quad (3.11)$$

ค่าความเร็วและตำแหน่งที่ถูกปรับของแต่ละอนุภาคจะสามารถคำนวณได้จากความเร็วในปัจจุบันและระยะห่างระหว่าง $pbest$, กับ $gbest$, ดังสมการ

$$\begin{aligned} u_i^{j(t+1)} = & w u_i^{j(t)} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_i - P_{Gi}^{j(t)}) \\ & + C_2 \cdot Rand() \cdot (gbest_i - P_{Gi}^{j(t)}), \end{aligned} \quad (3.12)$$

$j = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, NG,$

$$P_{Gi}^{j(t+1)} = P_{Gi}^{j(t)} + u_i^{j(t+1)}, \quad j = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, NG, \quad (3.13)$$

$$u_i^{\min} \leq u_i^j \leq u_i^{\max}, \quad (3.14)$$

เมื่อ

- M คือจำนวนอนุภาคในกลุ่ม
- NG คือจำนวนของสมาชิกในอนุภาค
- t คือจำนวนครั้งที่ค้นหา
- w คือค่าตัวประกอบความเฉื่อย (Inertia weight factor).
- c_1, c_2 คือค่าความคงที่อัตราเร่ง (Acceleration constants)
- $rand(), Rand()$ คือค่าการสุ่มแบบสม่ำเสมอในช่วง $[0,1]$
- $u_i^{j(t)}$ คือความเร็วใหม่ของอนุภาค j ที่สอดคล้องกับ P_{Gi} ในการค้นหาครั้งที่ t
- $P_{Gi}^{j(t)}$ คือความเร็วเดิมของ j ที่สอดคล้องกับ P_{Gi} ในการค้นหาครั้งที่ t

ถ้า u_i^{\max} จะเป็นตัวกำหนดค่าความเหมาะสม (Fitness) ว่าบริเวณใดสมควรจะถูกค้นหา ระหว่างตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งเป้าหมาย ถ้า u_i^{\max} มีค่ามากเกินไป อนุภาคอาจเคลื่อนผ่านคำตอบที่ดีที่สุด และถ้า u_i^{\max} มีค่าน้อยเกินไปก็อาจทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนผ่านข้ามคำตอบเฉพาะ

บริเวณได้ (Local solution) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของหลายงานได้พบว่าค่า w_{max} ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 10–20% ของช่วงของตัวแปร (G. Zwe-Lee, 1993)

สำหรับค่าคงที่ c_1 และ c_2 จะเป็นค่าถ่วงน้ำหนักในการเร่งให้อนุภาคเคลื่อนไปทาง $pbest_i$ และ $gbest_i$ ค่าที่ต่ำจะทำให้อนุภาคค้นหาในบริเวณที่ไกลจากเป้าหมาย ในทางกลับกันค่าที่สูงจะทำให้อนุภาคเคลื่อนผ่านเป้าหมายไป จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าค่า c_1 และ c_2 ที่เหมาะสมจะมีค่าเป็น 2.0 (G. Zwe-Lee, 1993; T. Aruldoss Albert Victoirea and A. Ebenezer Jeyakumarb, 2004) ค่าตัวประกอบความเฉื่อย w ที่เหมาะสมจะช่วยให้การค้นหาที่มีความสมดุลระหว่างการค้นหาคำตอบเฉพาะบริเวณ (Local Exploration) และการค้นหาคำตอบจากขอบเขตทั้งหมด (Global Exploration) ซึ่งจะทำให้ใช้จำนวนครั้งในการค้นหาน้อยลง โดยทั่วไป มักจะถูกกำหนดให้มีค่าที่ลดลงจาก 0.9 เป็น 0.4 ระหว่างการค้นหาคำตอบ (G. Zwe-Lee, 1993; T. Aruldoss Albert Victoirea and A. Ebenezer Jeyakumarb, 2004) โดยทั่วไปค่า w จะถูกกำหนดด้วยสมการ

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{M} \cdot t \quad (3.15)$$

มูลค่าของผลลัพธ์ (Evaluation Value) คำนวณตามสมการ

$$EV = 1 / (F_{cost} + P_{phc}) \quad (3.16)$$

เมื่อ

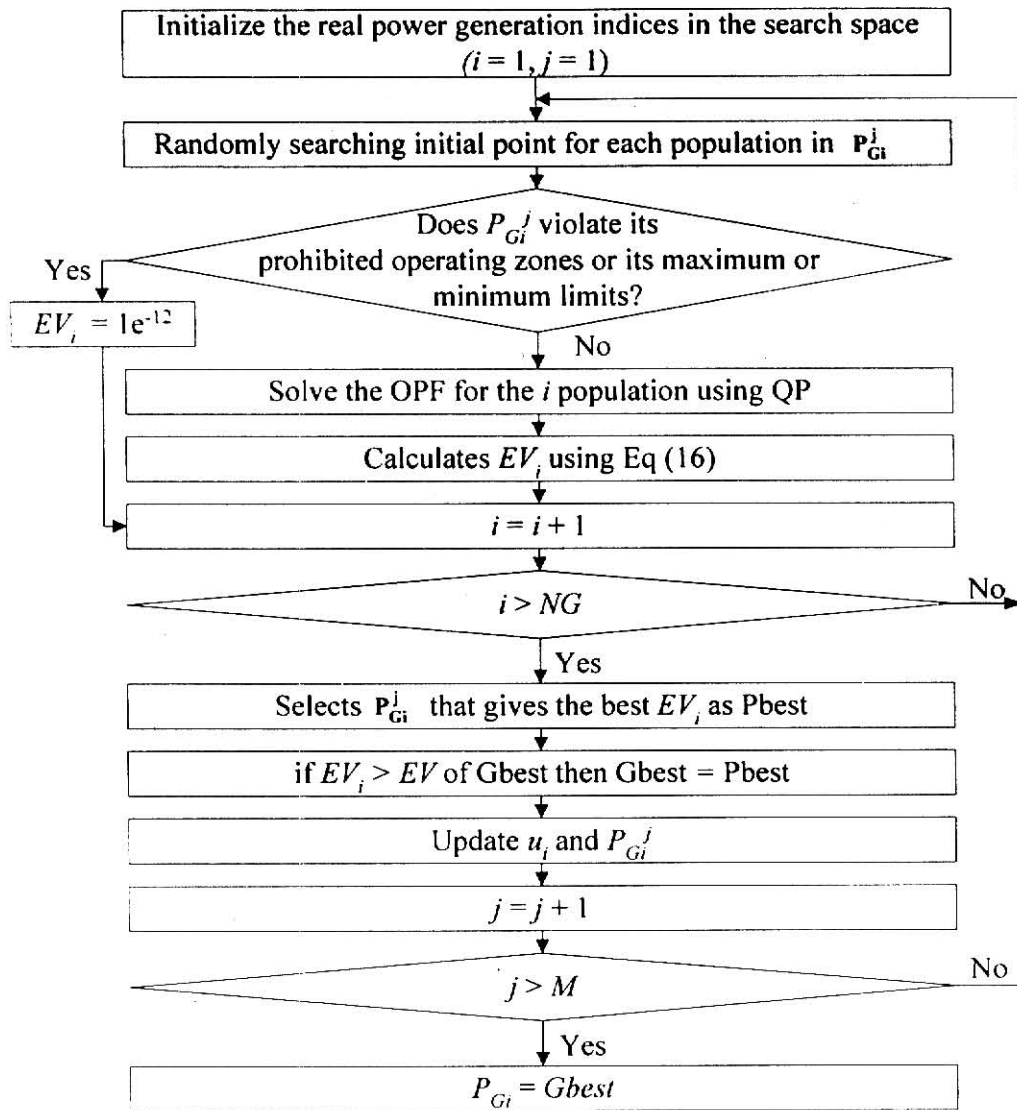
$$F_{cost} = 1 + abs \frac{\sum_{i \in BG_i} F(P_{Gi}) - F_{min}}{(F_{max} - F_{min})} \quad (3.17)$$

$$P_{phc} = 1 + \left(\sum_{i \in BG_i} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{NB} P_{Pi} - P_{loss} \right)^2 \quad (3.18)$$

F_{max} คือต้นทุนการผลิตสูงสุดของกลุ่มประชากรเริ่มต้น ($P_{Gi}^0 = [P_{G1}^0, P_{G2}^0, \dots, P_{G,NG}^0]^T$)

F_{min} คือต้นทุนการผลิตต่ำสุดของกลุ่มประชากรเริ่มต้น ($P_{Gi}^0 = [P_{G1}^0, P_{G2}^0, \dots, P_{G,NG}^0]^T$)

เพื่อเป็นการพิจารณาให้ขอบเขตของมูลค่าของผลลัพธ์อยู่ในช่วงที่เป็นไปได้คือผลลัพธ์จะต้องเป็นไปตามข้อจำกัดในสมการที่ (3.2) - (3.5) ดังนั้นก่อนที่จะทำการประเมินมูลค่าผลลัพธ์ตามสมการที่ (3.16) ถ้าผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามข้อจำกัดดังกล่าวก็จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าคงที่ให้ F_{cost} มีค่ามากขึ้น แต่ผลลัพธ์เป็นไปตามข้อจำกัดดังกล่าวก็จะมี F_{cost} ที่ต่ำ กระบวนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการคำนวณ

บทที่ 4

ผลการทดสอบวิธีการ

การทดสอบกระทำโดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณวิธีการที่เสนอระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำมาใช้คือ ระบบทดสอบที่ใช้คือระบบมาตรฐาน 30 บัส และ 118 บัสของ IEEE

4.1 การทดสอบวิธีการกับระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

ระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และได้แสดงรายละเอียดของระบบในภาคผนวก ก. โดยได้แสดงฟังก์ชันต้นทุนการผลิตและช่วงกำลังการผลิตที่โรงไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ (Prohibited operating zones) ในตารางที่ 4.1 โดยใช้ค่าตัวแปรในการหาคำตอบด้วย PSO ดังต่อไปนี้

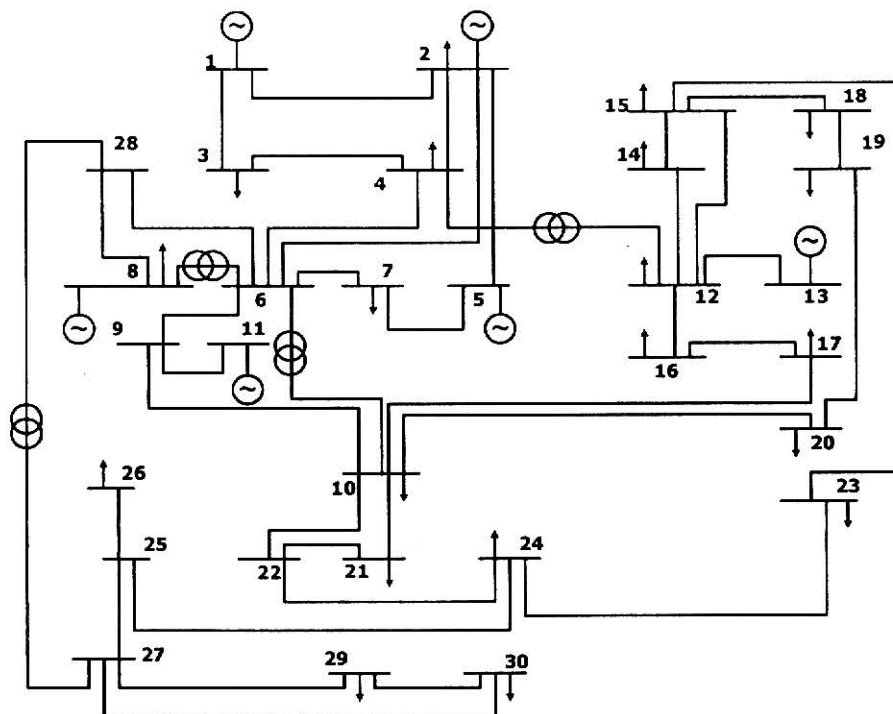
Population size = 200,

Generation (M) = 10,

$w_{\min} = 0.4$, $w_{\max} = 0.9$,

$u_i^{\max} = 0.5 \cdot P_{Gi}^{\max}$, $u_i^{\min} = -0.5 \cdot P_{Gi}^{\min}$,

$C_1 = 2$, $C_2 = 2$.



ภาพที่ 4.1 ระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE

ตารางที่ 4.1 ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตและช่วงกำลังงานที่ไม่สามารถทำงานได้ของระบบไฟฟ้า
มาตรฐาน 30 บัสของ IEEE

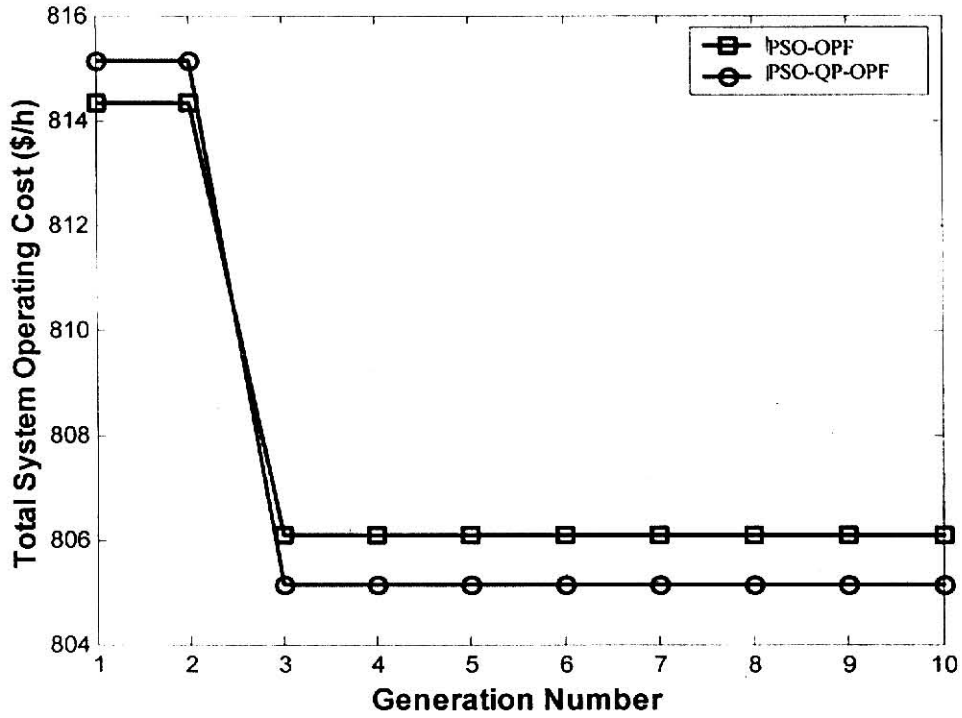
Gen Bus	$F(P_{Gi}) = a_i + b_i \cdot P_{Gi} + c_i \cdot P_{Gi}^2$			P_{Gi}^{\min}	P_{Gi}^{\max}	Generator Prohibited Operating Zone			
	a_i	b_i	c_i	MW	MW	From MW	To MW	From MW	To MW
1	0	2	0.00375	50	200	100	120	150	160
2	0	1.75	0.0175	20	80	25	30	40	60
5	0	1	0.0625	15	50	20	25	40	45
8	0	3.25	0.00834	10	35	15	20	25	30
11	0	3	0.025	10	30	15	18	22	25
13	0	3	0.025	12	40	20	25	30	35

ตารางที่ 4.2 ผลการหาคำตอบในระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE

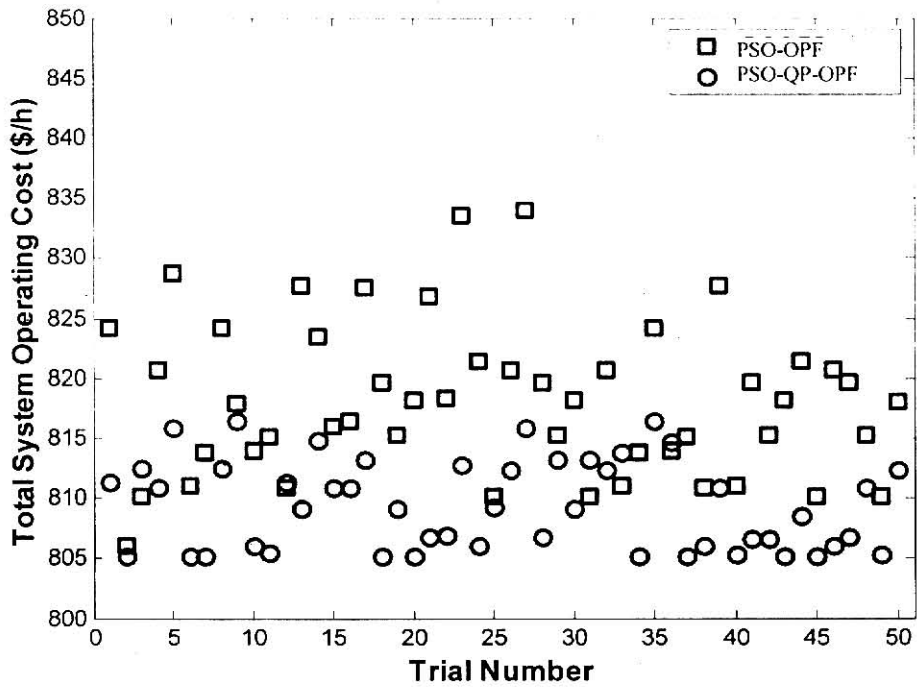
	PSO-OPF			PSO-QP-OPF		
	Min	Aver.	Max	Min	Aver.	Max
Total System Operating Cost (\$/h)	806.10	818.13	834.05	805.14	809.46	816.47
Computation Time of the Best Trial Solution (sec)	52.67			69.39		

ตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ในการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (PSO) และวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับวิธีการโปรแกรมควอดราติก (PSO-QP) โดยเป็นค่าจากการทดสอบการคำนวณรวม 50 ครั้ง การรู้เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วย PSO และ PSO-QP ได้แสดงในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.4 แสดงผลลัพธ์ค่าต้นทุนการผลิตจากการคำนวณด้วยวิธี PSO และ PSO-QP เปรียบเทียบกัน 50 ครั้ง พบว่าคำตอบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี PSO-QP มีแนวโน้มจะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีการ PSO โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี PSO-QP จะมากกว่าวิธีการ PSO เนื่องจากจะมีการหาคำตอบในแต่ละเงื่อนไขของกลุ่มประชากรด้วยโปรแกรมควอดราติก อย่างไรก็ตามการคำนวณด้วยวิธีการ PSO-QP ยังมีโอกาสที่จะให้คำตอบที่เป็นค่าต่ำสุดของต้นทุนการผลิตที่เป็นคำตอบจริง (Global Minimum) ได้มากกว่า



ภาพที่ 4.2 การลู่เข้าของวิธี PSO และ PSO-QP จากการทดสอบกับระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE



ภาพที่ 4.3 ค่าตอบของวิธี PSO และ PSO-QP จากการทดสอบกับระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE รวม 50 ครั้ง

4.2 การทดสอบวิธีการกับระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส

เนื่องจากในระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE จะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายกำลังงานไฟฟ้าจริงออกมาจำนวนหนึ่งซึ่งถูกพิจารณาเป็นบัสที่มีแหล่งจ่ายกำลังงานเสมือนและเป็นบัสควบคุมแรงดัน (Voltage Control Bus) และมีบางบัสมีกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นในการทดสอบจะกำหนดให้บัสดังกล่าวค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงเป็นศูนย์แต่พิจารณาให้เป็นบัสควบคุมแรงดัน ดังนั้นทดสอบแบบจำลองกับระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE จะใช้ข้อมูลที่มีการปรับเปลี่ยนเล็กน้อยดังแสดงในภาคผนวก ข. โดยได้แสดงฟังก์ชันต้นทุนการผลิตและช่วงกำลังการผลิตที่โรงไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ (Prohibited operating zones) ในตารางที่ 4.3 โดยใช้ค่าตัวแปรในการหาคำตอบด้วย PSO ดังต่อไปนี้

$$\text{Population size} = 2000,$$

$$\text{Generation } (M) = 100,$$

$$w_{\min} = 0.4, w_{\max} = 0.9,$$

$$u_i^{\max} = 0.5 \cdot P_{Gi}^{\max}, u_i^{\min} = -0.5 \cdot P_{Gi}^{\min},$$

$$C_1 = 2, C_2 = 2.$$

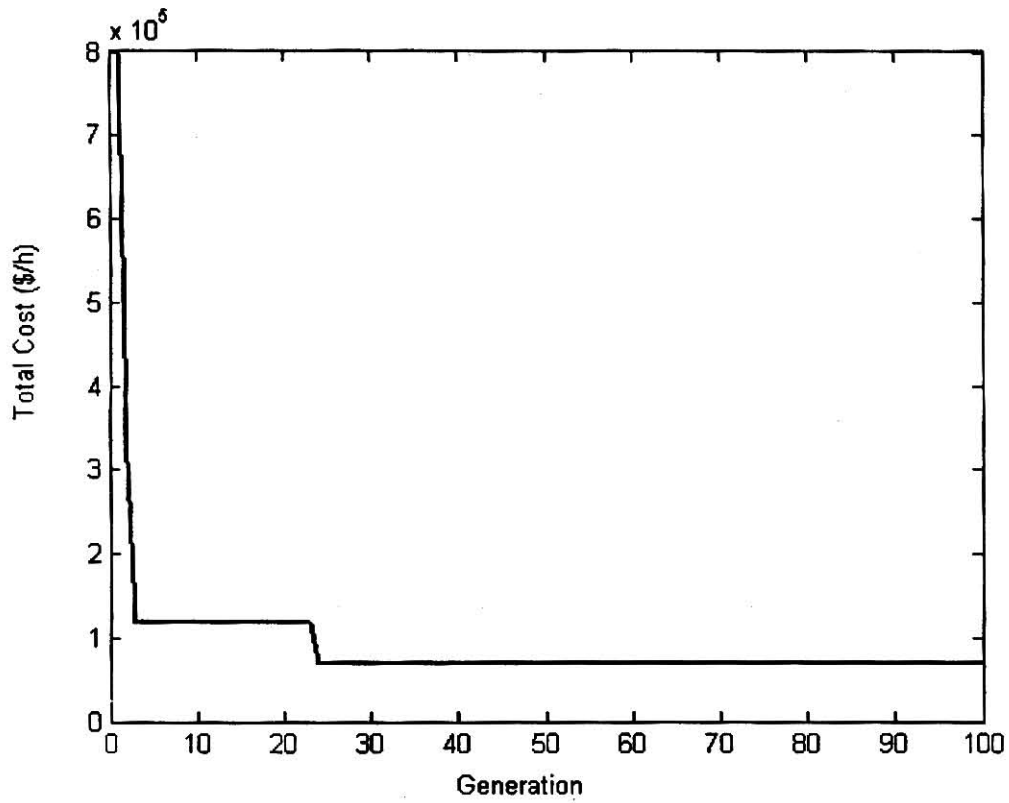
โดยการหาคำตอบด้วยวิธี PSO ไม่สามารถให้คำตอบที่เป็นไปได้ ส่วนวิธี PSO-QP นั้นให้คำตอบที่ดูเข้าสู่เงื่อนไขการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตลดลงดังภาพที่ 4.4 โดยจากการทดสอบโปรแกรม 20 ครั้งพบว่าวิธีการ PSO-QP มีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่มีต้นทุนการผลิตต่ำดังภาพที่ 4.5 แต่ยังมีการใช้เวลาที่ค่อนข้างนานสำหรับระบบขนาดใหญ่ การปรับปรุงสามารถทำได้โดยการใช้การประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แบบขนาน (Parallel Processor) โดยของคำตอบที่ดีที่สุดจากการทดสอบการคำนวณ 20 ครั้งมีค่าสรุปดังนี้

```
-----
** ** System-Grid Total ** **
-----
```

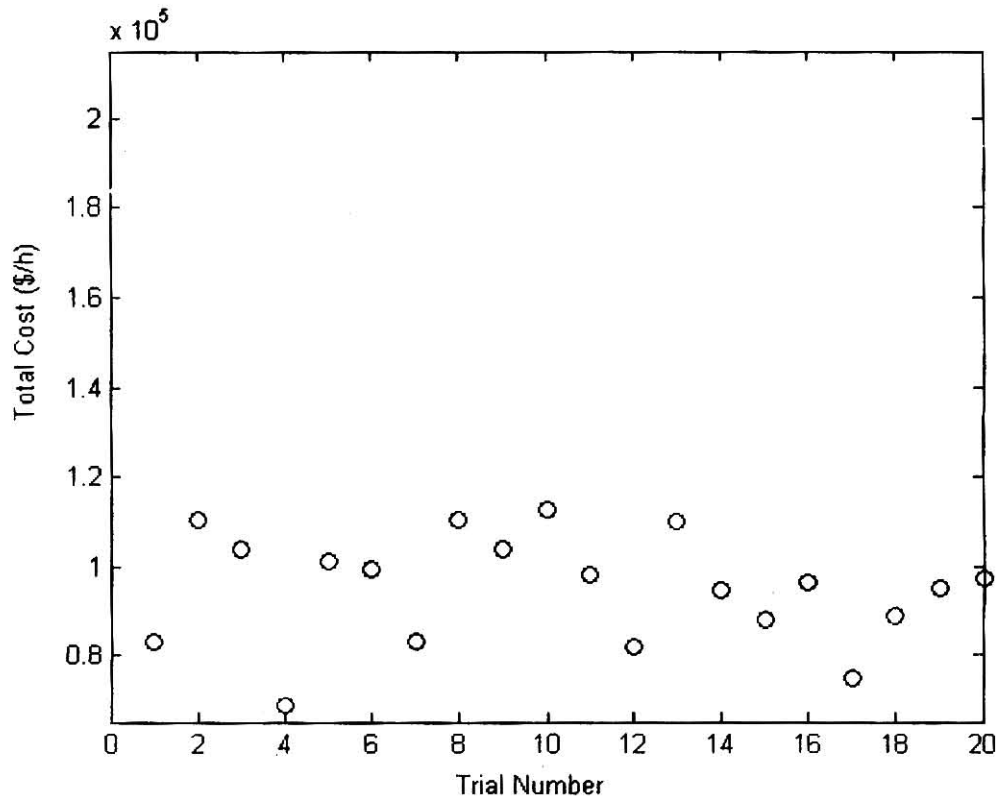
Total Generation	=	3797.83	MW	-465.62	MVAR
Total P-Q Load	=	3668.00	MW	1438.00	MVAR
SHUNT VAR	=			-100.14	MVAR
Total Power Losses	=	129.83	MW	-2003.76	MVAR
Overall P Mismatch	=	0.0000	MW		

ตารางที่ 4.3 ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตและช่วงกำลังงานที่ไม่สามารถทำงานได้ของระบบไฟฟ้า
มาตรฐาน 30 บัสของ IEEE

Gen Bus	$F(P_{Gi}) = a_i + b_i \cdot P_{Gi} + c_i \cdot P_{Gi}^2$			P_{Gi}^{\min} MW	P_{Gi}^{\max} MW	Generator Prohibited Operating Zone			
	a_i	b_i	c_i			From MW	To MW	From MW	To MW
10	86.2291	4.9354	0.9592	50	150	55	60	135	143
12	28.7905	2.9278	0.1592	30	200	33	36	180	190
25	24.5941	6.5176	0.1762	35	200	39	42	180	190
26	29.5583	8.7891	0.9982	75	200	83	90	180	190
31	99.1105	1.7076	0.9668	75	200	83	90	180	190
46	45.7861	1.4488	0.2321	25	250	28	30	225	238
49	95.0451	0.8609	0.6368	53	250	58	63	225	238
54	81.0738	8.1244	0.0020	75	150	83	90	135	143
59	81.9972	7.2853	0.8644	45	200	50	54	180	190
61	67.3710	0.1743	0.2144	75	2000	83	90	1800	1900
65	60.0209	4.0453	0.2279	50	250	55	60	225	238
66	60.1679	5.4526	0.8465	50	250	55	60	225	238
69	4.8651	0.1527	0.9345	75	250	83	90	225	238
80	22.0043	7.8252	0.2506	70	350	77	84	315	333
87	28.4306	1.3979	0.4085	75	200	83	90	180	190
89	4.7133	6.7976	0.5069	75	200	83	90	180	190
100	75.7658	0.4748	0.4482	39	150	43	47	135	143
103	18.2106	6.2077	0.6482	10	100	11	12	90	95
111	15.7765	1.4557	0.4602	75	200	83	90	180	190



ภาพที่ 4.4 การลู่เข้าของวิธี PSO-QP จากการทดสอบกับระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE



ภาพที่ 4.5 ค่าตอบของวิธี PSO-QP จากการทดสอบกับระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE รวม 20 ครั้ง

บทที่ 5

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำงานพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของ OPF ด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (PSO) สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตไม่ต่อเนื่อง โดยได้มีการทดสอบคำนวณ PSO ร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้น (PSO-QP) และได้ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการคำนวณกับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 30 บัส และ 118 บัส ของ IEEE

จากผลการทดสอบพบว่ากระบวนการหาคำตอบด้วยวิธี PSO-QP ให้ผลการคำนวณที่ดีกว่าวิธีการ PSO ในการทดสอบกับระบบขนาดเล็กคือระบบ 30 บัสของ IEEE และในระบบไฟฟ้า 118 บัสของ IEEE ก็สามารถหาคำตอบที่ดีกว่า โดยสามารถรวมข้อจำกัดช่วงกำลังการผลิตที่ไม่สามารถทำงานได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Prohibited Zone) อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการดังกล่าวในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นในการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้จึงต้องมีการพัฒนาในด้านความเร็วในการคำนวณ และพัฒนาแบบจำลองให้รองรับข้อจำกัดอื่นของระบบได้

ทั้งนี้การนำวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานสามารถทำได้โดยการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังจริงที่จะนำไปใช้และสามารถใช้เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) ที่แนะนำผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังได้

บรรณานุกรม

- 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, Vol. 17, No. 2, 2002, pp. 411-416.
- Bakirtzis A. G., Biskas P. N., Zoumas C. E., and Petridis V., "Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm," IEEE Transaction on Power System, Vol. 17, No. 2, 2002, pp. 229-236.
- Chen P. H. and Chang H. C., "Large-Scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm," IEEE Transaction on Power System, Vol. 10, No. 4, 1995, pp. 1919-1926.
- Damousis I. G., Bakirtzis A. G., and Dokopoulos P. S., "Network-Constrained Economic Dispatch Using Real-Coded Genetic Algorithm," IEEE Transaction on Power System, Vol. 18, No. 1, 2003, pp. 198-205.
- 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, Vol. 6, No. 3, 1991, pp. 1099-1105.
- Kennedy J. and Eberthart R., "Particle Swarm Optimization", Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol.IV, pp.1942-1948, 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, Vol. 17, No. 1, 2002, pp. 108-112.
- Lin W. M., Cheng F. S., and Tsay M. T., "Nonconvex Economic Dispatch by Integrated Artificial Intelligence," IEEE Transaction on Power System, Vol. 16, No. 2, 2001, pp. 307-311.
- Park J., Lee K., Shin J., and Lee K. Y., "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions", IEEE Trans. Power Syst., vol.15, no.4, 2000, pp. 1232-1239.
- Srinivasan D. and Sheble G. B., "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve-Point Loading", IEEE Trans. Power Syst., vol.8, no.3, 1993, pp. 1325-1331.
- Victoirea T. A. A. and Jeyakumarb A. E., "Hybrid PSO-SQP for Economic Dispatch with Valve-Point Effect", Electric Power System Research, Vol.71, 2004, pp. 51-59.
- Victoirea T. A. A. and Jeyakumarb A. E., "Deterministically Guided PSO for Dynamic Dispatch Considering Valve-Point Effect", Electric Power System Research, Vol.73, 2005, pp. 313-322.

- Walters D. C. and Sheble' G. B., "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading," IEEE Transaction on Power System, Vol. 8, No. 3, 1993, pp. 1325-1332.
- Wood A. J. and Wollenberg B. F., *Power Generation, Operation and Control*, John Wiley & Sons, Canada 1996.
- 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, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 112-118.
- Yuryevich J. and Wong K. P., "Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm," IEEE Transaction on Power System, Vol. 14, No. 4, 1999, pp. 1245-1250.
- Zwe-Lee G., "Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints", IEEE Trans. Power Syst., vol.18, no.3, Aug. 2003, pp. 1187-1195.
- Abdul-Rahman K. H. and Shahidchpour S. M., "A Fuzzy-Based Optimal Reactive Power Control," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 662-670, 1993.
- Attaviriyapap 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, Vol. 17, No. 2, 2002, pp. 411-416.
- Bakirtzis A. G., Biskas P. N., Zoumas C. E., and Petridis V., "Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm," IEEE Transaction on Power System, Vol. 17, No. 2, 2002, pp. 229-236.
- Chen P. H. and Chang H. C., "Large-Scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm," IEEE Transaction on Power System, Vol. 10, No. 4, 1995, pp. 1919-1926.
- Damousis I. G., Bakirtzis A. G., and Dokopoulos P. S., "Network-Constrained Economic Dispatch Using Real-Coded Genetic Algorithm," IEEE Transaction on Power System, Vol. 18, No. 1, 2003, pp. 198-205.
- Edwin W.-H. Liu and X. Guan, "Fuzzy Constraint Enforcement and Control Action Curtailment in an Optimal Power Flow," IEEE Trans. on Power System, vol. 11, no. 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, Vol. 6, No. 3, 1991, pp. 1099-1105.
- Guan X., Edwin Liu W.-H. and Papalexopoulos A. D., "Application of Fuzzy Set Method in an Optimal Power flow," Electric Power Systems Research, vol. 34, pp. 11-18, 1995.

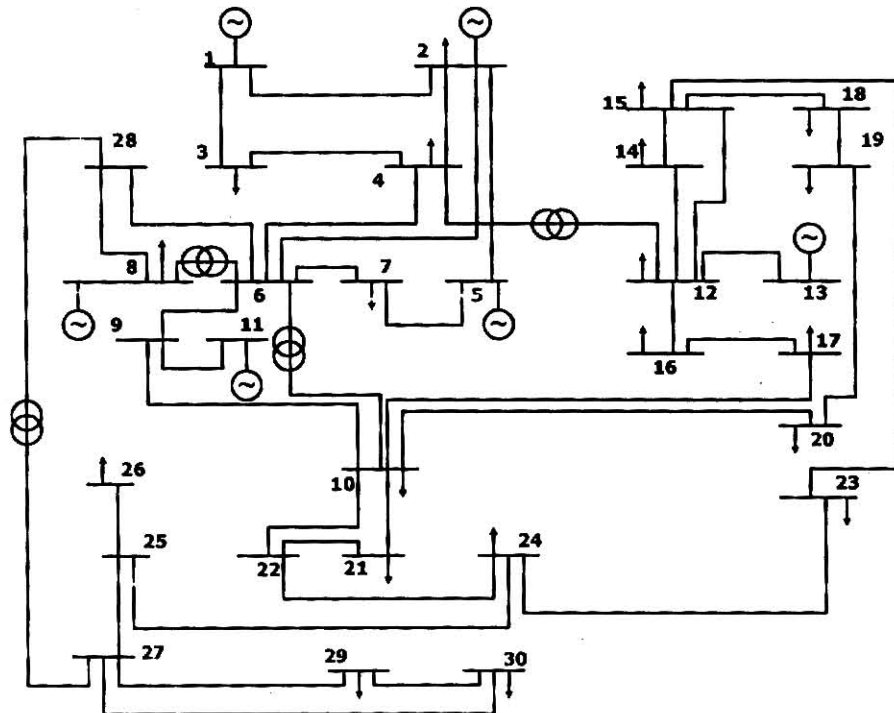
- Lin W. M., Cheng F. S., and Tsay M. T., "An Improved Tabu Search for Economic Dispatch with Multiple Minima," IEEE Transaction on Power System, Vol. 17, No. 1, 2002, pp. 108-112.
- Lin W. M., Cheng F. S., and Tsay M. T., "Nonconvex Economic Dispatch by Integrated Artificial Intelligence." IEEE Transaction on Power System, Vol. 16, No. 2, 2001, pp. 307-311.
- Tomsovic K., "Fuzzy Linear Programming Approach to the Reactive Power/Voltage Control Problem." IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 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, Vol. 8, No. 3, 1993, pp. 1325-1332.
- 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, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 112-118.
- Yuryevich J. and Wong K. P., "Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm." IEEE Transaction on Power System, Vol. 14, No. 4, 1999, pp. 1245-1250.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

ภาคผนวก ก. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส



ภาพที่ ก.1 ระบบมาตรฐาน 30 บัสของ IEEE

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

Power Flow Result OPF Using PSO-QP (Best of 50 Trials)

BUS	NAME	V	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
1	GEN****1	1.06	0	182.1	-6.2	0	0	0
2	GEN****2	1.045	-3.8	40	41	21.7	12.7	0
3	LOAD***3	1.025	-5.5	0	0	2.4	1.2	0
4	LOAD***4	1.017	-6.6	0	0	7.6	1.6	0
5	GEN****5	1.01	-10.5	18.9	26.9	94.2	19	0
6	LOAD***6	1.013	-7.7	0	0	0	0	0
7	LOAD***7	1.004	-9.4	0	0	22.8	10.9	0

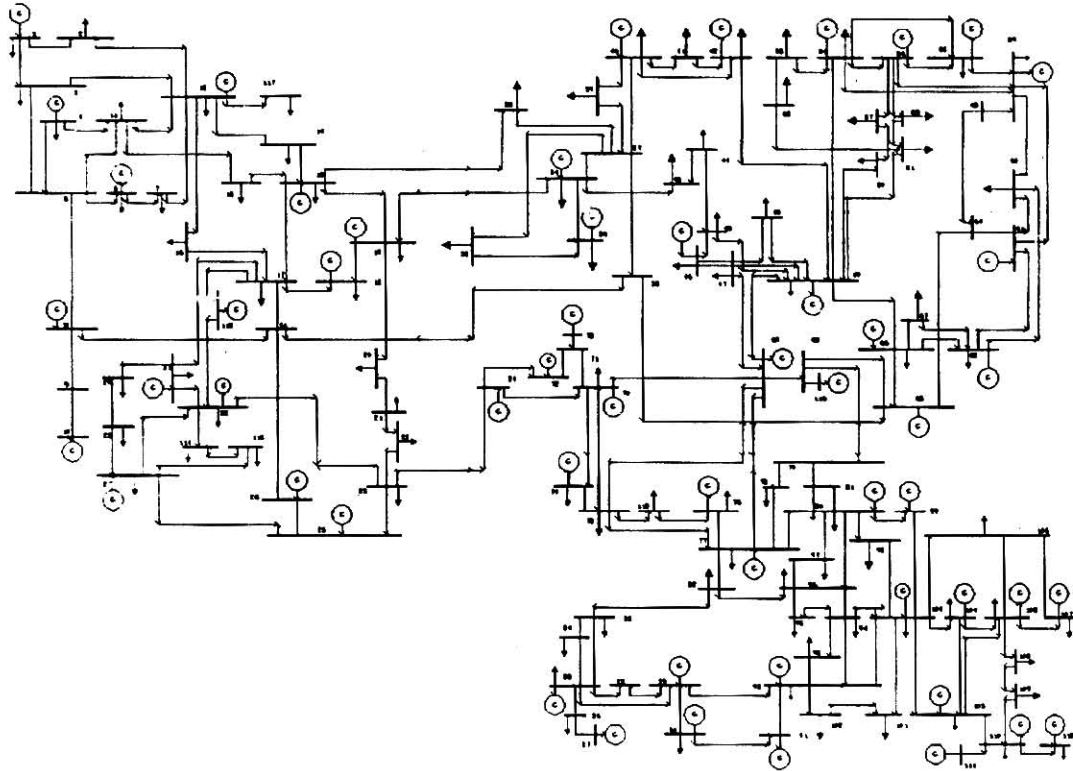
8	GEN****8	1.01	-7.7	30	19.9	30	30	0
9	LOAD***9	1.053	-9.9	0	0	0	0	0
10	LOAD**10	1.048	-11.6	0	0	5.8	2	20.8
11	GEN***11	1.082	-8.8	10	15.2	0	0	0
12	LOAD**12	1.06	-10.8	0	0	11.2	7.5	0
13	GEN***13	1.071	-9.9	12	8.5	0	0	0
14	LOAD**14	1.045	-11.7	0	0	6.2	1.6	0
15	LOAD**15	1.04	-11.8	0	0	8.2	2.5	0
16	LOAD**16	1.048	-11.4	0	0	3.5	1.8	0
17	LOAD**17	1.042	-11.8	0	0	9	5.8	0
18	LOAD**18	1.031	-12.4	0	0	3.2	0.9	0
19	LOAD**19	1.028	-12.6	0	0	9.5	3.4	0
20	LOAD**20	1.032	-12.4	0	0	2.2	0.7	0
21	LOAD**21	1.035	-12.1	0	0	17.5	11.2	0
22	LOAD**22	1.036	-12.1	0	0	0	0	0
23	LOAD**23	1.03	-12.2	0	0	3.2	1.6	0
24	LOAD**24	1.024	-12.5	0	0	8.7	6.7	4.5
25	LOAD**25	1.019	-12.2	0	0	0	0	0
26	LOAD**26	1.002	-12.6	0	0	3.5	2.3	0
27	LOAD**27	1.025	-11.8	0	0	0	0	0
28	LOAD**28	1.009	-8.1	0	0	0	0	0
29	LOAD**29	1.005	-13	0	0	2.4	0.9	0
30	LOAD**30	0.994	-13.9	0	0	10.6	1.9	0

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส

- Network data
- Power Flow Results

ภาคผนวก ข. ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 118 บัส



ภาพที่ ข.1 ระบบมาตรฐาน 118 บัสของ IEEE

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

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
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
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

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
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
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

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
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
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

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B/2 (p.u.)	MVA
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	MVA _r
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
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

At Bus	MW	MVA _r
57	12	3
58	12	3
59	277	113
60	78	3
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
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

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	CollCnr	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
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

BUS	NAME	V	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
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	CapitlHI	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
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	Pinevll	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	Saltvll	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

BUS	NAME	V	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
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 OPF Using PSO-QP (Best of 20 Trials)

BUS	NAME	V	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
1	Riversde	0.976	-13.6	0	0	51	27	0
2	Pokagon	0.98	-12.8	0	0	20	9	0
3	HickryCk	0.992	-12.8	0	0	39	10	0
4	NwCarlsI	1.039	-9.6	0	0	30	12	0
5	Olive	1.044	-9.2	0	0	0	0	43.6
6	Kankakee	1.008	-11.3	0	0	52	22	0
7	JacksnRd	1	-11.6	0	0	19	2	0
8	Olive	1.066	-4.9	0	0	0	0	0
9	Bequine	1.096	-1.1	0	0	0	0	0
10	Breed	1.05	3.3	264.7	-297.5	0	0	0
11	SouthBnd	1.001	-11.4	0	0	70	23	0
12	TwinBrch	0.99	-11.7	50.5	-61.9	47	10	0
13	Concord	0.985	-12.1	0	0	34	16	0
14	GoshenJt	0.987	-11.8	0	0	14	1	0
15	FtWayne	0.978	-10.1	0	0	90	30	0
16	N.E.	0.989	-11	0	0	25	10	0
17	Sorenson	1.008	-7.1	0	0	11	3	0
18	McKinley	0.972	-9.2	0	0	60	34	0
19	Lincoln	0.962	-9.8	9	-54	45	25	0
20	Adams	0.967	-8.3	0	0	18	3	0
21	Jay	0.974	-6.4	0	0	14	8	0
22	Randolph	0.99	-3.4	0	0	10	5	0
23	CollCrrr	1.024	2.1	0	0	7	3	0
24	Trenton	1.027	0.8	0	0	0	0	0
25	TannrsCk	1.05	10.4	129.7	-5.2	0	0	0
26	TannrsCk	1.015	14.3	563	-50	0	0	0

BUS	NAME	V	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
27	Madison	0.988	-1.3	0	0	62	13	0
28	Mullin	0.975	-2.2	0	0	17	7	0
29	Grant	0.967	-2.3	0	0	24	4	0
30	Sorenson	1.02	-3.3	0	0	0	0	0
31	DeerCrk	0.967	-1.8	113	-42.3	43	27	0
32	Delaware	0.986	-2.3	0	0	59	23	0
33	Haviland	0.984	-11.2	0	0	23	9	0
34	Rockhill	0.996	-11.1	0	0	59	26	13.9
35	WestLima	0.983	-11.3	0	0	33	9	0
36	Sterling	0.98	-11.2	9	-62.5	31	17	0
37	EastLima	1.005	-10.6	0	0	0	0	-25.2
38	EastLima	0.995	-6.6	0	0	0	0	0
39	NwLibrty	0.981	-12.7	0	0	27	11	0
40	WestEnd	0.978	-13	0	0	20	23	0
41	S.Tiffin	0.974	-13.7	0	0	37	10	0
42	Howard	0.988	-12.6	0	0	37	23	0
43	S.Kenton	0.982	-12.5	0	0	18	7	0
44	WMVernon	0.966	-12	0	0	16	8	-9.3
45	N.Newark	0.973	-11	0	0	53	22	-9.5
46	W.Lancst	1.005	-8.7	38	16.3	28	10	-10.1
47	Crooksvl	1.02	-7.6	0	0	34	0	0
48	Zanesvll	1.01	-8	0	0	20	11	-15.3
49	Philo	1.025	-7.4	120.3	104.6	87	30	0
50	WCambrdg	1.004	-9.4	0	0	17	4	0
51	Newcmrst	0.973	-11.8	0	0	17	8	0
52	SCoshoct	0.964	-12.7	0	0	18	5	0
53	Wooster	0.951	-13.4	0	0	23	11	0
54	Torrey	0.955	-12.3	113	-42.3	113	32	0
55	Wagenhls	0.952	-12.8	9	-8.6	63	22	0
56	Sunnysde	0.955	-12.6	0	0	84	18	0
57	WNwPhil1	0.974	-11.6	0	0	12	3	0
58	WNwPhil2	0.964	-12.5	0	0	12	3	0
59	Tidd	0.985	-10.6	91.6	64.2	277	113	0
60	SWKammer	0.993	-6.9	0	0	78	3	0
61	W.Kammer	0.995	-6.1	113	-54.4	0	0	0
62	Natrium	0.998	-6.4	8	-7.3	77	14	0
63	Tidd	0.972	-7	0	0	0	0	0
64	Kammer	0.987	-5.2	0	0	0	0	0
65	Muskngum	1.005	-1.5	230.1	-107.3	0	0	0
66	Muskngum	1.05	-1.7	375	-10	39	18	0
67	Summerfl	1.021	-4.6	0	0	28	7	0
68	Sporn	1.01	-0.8	0	0	0	0	0
69	Sporn	1.035	0	304.2	-131.7	0	0	0
70	Portsmth	1.002	-4.3	0	0	66	20	0
71	NPortsmt	1.008	-3.9	0	0	0	0	0
72	Hillsbro	1.025	-1.8	0	0	0	0	0
73	Sargents	1.009	-3.9	0	0	0	0	0
74	Bellefnt	0.965	-6	0	0	68	27	-11.2
75	SthPoint	0.977	-5.1	0	0	47	11	0
76	Darrah	0.947	-6.1	0	0	68	36	0
77	Turner	1.006	-1.2	17.5	30.2	61	28	0

BUS	NAME	V	DEL	Pgen	Qgen	Pload	Qload	ShtVAR
78	Chemical	1	-1.5	0	0	71	26	0
79	CapitolHI	1	-1.2	0	0	39	32	-20
80	CabinCrk	1.04	0.5	280.5	118.9	130	26	0
81	Kanawha	1.006	-0.3	0	0	0	0	0
82	Logan	0.971	2.7	0	0	54	27	-18.8
83	Sprigg	0.964	5.4	0	0	20	10	-9.3
84	BetsyLne	0.971	10.2	0	0	11	7	0
85	BeaverCk	0.982	12.8	0	0	24	15	0
86	Hazard	0.99	16.7	0	0	21	10	0
87	Pineville	1.015	25.5	75	3.1	0	0	0
88	Fremont	0.987	15.7	0	0	48	10	0
89	ClinchRv	1.005	19.6	563	-18.1	0	0	0
90	Holston	0.98	16	0	0	78	42	0
91	HolstonT	0.989	14.8	0	0	0	0	0
92	Saltville	0.995	13	0	0	65	10	0
93	Tazewell	0.987	8.9	0	0	12	7	0
94	Switchbk	0.988	5.8	0	0	30	16	0
95	Caldwell	0.976	4	0	0	42	31	0
96	Baileysv	0.985	2.8	0	0	38	15	0
97	Sundial	1.008	1.3	0	0	15	9	0
98	Bradley	1.025	1.3	0	0	34	8	0
99	Hinton	1.027	4.4	0	0	0	0	0
100	GlenLyn	1.017	6.1	291	44	37	18	0
101	Wythe	0.996	8.1	0	0	22	15	0
102	Smythe	0.995	11.3	0	0	5	3	0
103	Claytor	1.01	2.5	24.1	92.3	23	16	0
104	Hancock	0.971	0.6	5.8	13.8	38	25	0
105	Roanoke	0.958	-0.2	0	0	31	26	-18.3
106	Cloverdl	0.957	-0.4	0	0	43	16	0
107	Reusens	0.94	-1.8	0	0	28	12	-5.3
108	Blaine	0.948	-1.3	0	0	2	1	0
109	Franklin	0.944	-1.7	0	0	8	3	0
110	Fieldale	0.937	-2.3	0	0	39	30	-5.3
111	DanRiver	0.939	-2.3	0	0	0	0	0
112	Danville	0.925	-3.3	0	0	25	13	0
113	DeerCrk	1.006	-6.5	0	0	0	0	0
114	WMedford	0.983	-2.4	0	0	8	3	0
115	Medford	0.982	-2.4	0	0	22	7	0
116	KygerCrk	1.011	-0.8	0	0	0	0	0
117	Corey	0.976	-13.3	0	0	20	8	0
118	WHuntngd	0.957	-6.1	0	0	33	15	0

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นายเกียรติ ชยะกุลศิริ

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 25 กันยายน 2515

สถานที่เกิด จังหวัดบุรีรัมย์

สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 11/108 ซอยพหลโยธิน 48 ถนนพหลโยธิน
แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 12120

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์และหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

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

