

การไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย

Optimal Reactive Power Flow of Electric Power Distribution System Integrating with Distributed Generating Plant

อุเทน ลีตัน และ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์
หน่วยวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
Email: Uthen.Leeton@gmail.com, Thanatchai@gmail.com

U. Leeton and T. Kulworawanichpong
Power System Research Unit, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000
Email: Uthen.Leeton@gmail.com, Thanatchai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็น การนำเสนองานไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generator: DG) ที่ใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าช่วยสถานีไฟฟ้า และการปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนานและการปรับแก้หม้อแปลง มีเป้าหมายในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง การปรับตั้งตัวแปรจะขึ้นอยู่กับค่าโหลด ใช้วิธีการค้นหาการปรับตั้งตัวแปรด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคพร้อมแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วยสถานีไฟฟ้าได้ อีกทั้งในช่วงเวลาที่มีโหลดน้อย กำลังไฟฟ้าจะเหลือในระบบ ส่งผลให้จ่ายกำลังไฟฟ้าไหลกลับคืนสู่สถานีไฟฟ้าทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าโดยรวมลดลง การติดตั้งตัวอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการปรับตั้งแก้หม้อแปลงสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวเพียงหนึ่งอย่าง และการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากกว่าปรับแก้หม้อแปลง โดยทดสอบกับระบบจำหน่าย 6 บัส

คำสำคัญ: การไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสม, กำลังสูญเสียที่น้อยที่สุด, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย, วิธีกลุ่มอนุภาค

Abstract

This paper describes reactive power flow optimization for electric power distribution systems integrating with distributed generating (Distributed Generator: DG) plants which can support daily load demand. To reduce the total energy losses of the entire system, transformer tap and reactive power injection from available reactive power source are required. The setting of variables based on a particular load demand is to minimize losses by using particle swarm optimization of solving optimal power flow problems. However, when the load is light, excessive power generation from the DG plant is fed back to the substation. This shows that such a power is sold to the local electric utility. This study shows that the full adjustment of both transformer taps and reactive power injection is the best solution than adjustment one transformer taps or one reactive power injection of all-day energy loss saving. Addition, reactive power injection results are better than transformer tap settings which illustrated in 6 bus test system.

Keywords: Optimal Reactive Power Flow, Power loss minimization, Distributed Generator, Particle Swarm Optimization

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายและผู้ใช้ไฟฟ้า โหลดของระบบเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง เมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงทำให้กระแสไหลผ่านสายส่งมากส่งผลให้แรงดันตก เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าสะสมที่สายส่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายสามารถช่วยสถานะไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้ เนื่องจากระยะทางการไหลกำลังไฟฟ้าที่สายส่งลดลงและช่วงเวลาที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย ทำให้กำลังไฟฟ้าเหลือจากระบบ สามารถที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหน่วยไฟฟ้าอื่นหรือเก็บกำลังไฟฟ้าไว้ในยามฉุกเฉินในรูปของระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage system) [1] การปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าดีขึ้นและค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังไฟฟ้าลดลง เช่น การจัดเรียงโครงสร้างการจ่ายไฟของระบบจำหน่าย [2] การติดตั้งหม้อแปลงปรับแรงดัน [3] ขดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ [4] ซึ่งบทความนี้ปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยการปรับแก้หม้อแปลงและขดเซยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ [5] และการหาค่าการปรับตั้งใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [6] เนื่องจากมีโครงสร้างอัลกอริทึมที่ง่ายแก่การศึกษาและเข้าใจ ใช้ค้นหาคำตอบในปัญหาที่หลากหลายโดยไม่ต้องคำนึงถึงการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันเหมือนวิธีเชิงตัวเลข

ในบทความนี้ในหัวข้อถัดไปเป็นหัวข้อที่ 2 แสดงถึงสมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน ผลเฉลยแรงดันบัสด้วยวิธีนิวตันราฟสัน สมการการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง หัวข้อที่ 3 สมการรูปแบบของปัญหาของการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดพร้อมทั้งแสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขอบเขตเงื่อนไขบังคับและการแยกกรณีพิจารณาในการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อปรับปรุงระบบไฟฟ้า หัวข้อที่ 4 อธิบายถึงหลักการของกระบวนการสืบค้นด้วยตนเองของวิธีกลุ่มอนุภาค หัวข้อที่ 5 เป็นกระบวนการทำงานของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของการไหลกำลังไฟฟ้า หัวข้อที่ 6 เป็นการจำลองและวิเคราะห์ผล รวมทั้งสรุปผลเป็นหัวข้อสุดท้าย

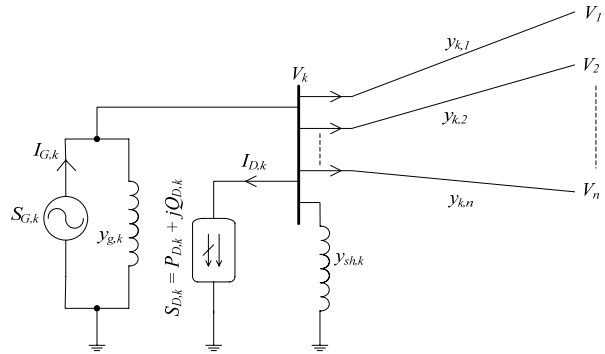
2. การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า [7]

2.1 สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นการแก้ปัญหาฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนในวงจรไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งจะหาคำตอบโดยวิธีตรงทำได้ยาก เมื่อแก้ปัญหาทางตรงไม่ได้ก็แก้ปัญหาทางอ้อม ซึ่งอาศัยเทคนิคเชิงตัวเลขเข้าช่วยในการคำนวณหาผลเฉลย ซึ่งเป็นการวนรอบซ้ำของผลเฉลย ซึ่งได้จากการสุ่มหาค่าเริ่มต้น จนกระทั่งผลเฉลยที่ได้ลู่เข้าคำตอบและค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การคำนวณเชิงตัวเลขมีอัตราการลู่เข้าเร็วและเป็นที่ยอมรับใช้กันมากคือวิธีการวนรอบแบบนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Iterative Methods)

การคำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังอาศัยพื้นฐานการวิเคราะห์แรงดันบัสต่าง ๆ เพื่อสร้าง

สมการ เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นทั่วไปจะใช้สมการสมดุลกระแสที่โหนดตามหลักของ KCL สำหรับในระบบไฟฟ้ากำลัง จะเปลี่ยนใช้หลักการสมดุลของกำลังไฟฟ้าที่บัสแทนค่าของกระแสดังกล่าว ผลจากการใช้กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน จะได้สมการที่เรียกว่า สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน ผลเฉลยของระบบสมการนี้ คือ เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ที่ยังไม่ทราบค่า พิจารณาจากระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากสมการโหนดจะได้สมการสมดุลกระแสที่โหนด k ใด ๆ ดังนี้

$$Y_{k,1}V_1 + Y_{k,2}V_2 + \dots + Y_{k,n}V_n = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (1)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i}V_i = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า ดังนั้น จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i}V_i = \left(\frac{S_{G,k} - S_{D,k}}{V_k} \right)^* \quad (3)$$

จัดสมการใหม่จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ เป็น

$$S_{G,k}^* - S_{D,k}^* = V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i}V_i \quad (4)$$

ถ้ากำหนดค่าเชิงซ้อนของกำลังไฟฟ้า เฟสเซอร์ของแรงดันและแอดมิตแตนซ์ดังนี้

$$S_{G,k} = P_{G,k} + jQ_{G,k} \quad (5)$$

$$S_{D,k} = P_{D,k} + jQ_{D,k} \quad (6)$$

จัดรูปสมการให้อยู่พีคิตเชิงซ้อนจะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนดังนี้

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^n (|Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i}) (|V_i| \angle \delta_i) \quad (7)$$

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| V_k V_i \angle (\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad (8)$$

โดยที่ $S_{G,k}^*$ คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ผลิตและถูกจ่ายเข้าบัส k

$S_{D,k}^*$ คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนของโหลดที่บัส k

$P_{G,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตและถูกจ่ายเข้าบัส k

$Q_{G,k}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตและถูกจ่ายเข้าบัส k

$P_{D,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส k

$Q_{D,k}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส k

V_k คือ เฟสเซอร์แรงดัน

$|V_k|$ คือ ขนาดเฟสเซอร์แรงดันที่บัส k

δ_k คือ มุมเฟสเซอร์แรงดันที่บัส k

Y_k คือ องค์ประกอบหรือสมาชิกเมตริกซ์บัสแอดมิต

แดนซ์แถวที่ k บัสที่ i

$|Y_k|$ คือ ขนาดเฟสเซอร์ของสมาชิกเมตริกซ์บัสแอดมิต

แดนซ์แถวที่ k บัสที่ i

θ_k คือ มุมเฟสเซอร์ของสมาชิกเมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์

แถวที่ k บัสที่ i

2.1 การหาผลเฉลยแรงดันของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีวนรอบนิวตันราฟสัน

การหาผลเฉลยแรงดันของปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการวนรอบนิวตันราฟสัน ใช้หลักการของอนุกรมเทเลอร์มาช่วยในการแก้ปัญหา จะติดอยู่ในรูปแบบอนุพันธ์ย่อย (partial differential) ที่เรียกว่า Jacobian Matrix จะได้สมการผลเฉลยแรงดันของนิวตันราฟสัน จากสมการที่ 8 สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนกำหนดให้

$$P_{sch,k} - jQ_{sch,k} = (P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) \quad (9)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้ จะทำให้สมการสมมูล อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดัน ซึ่งบทความนี้กำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นของทุกบัสมีค่าเป็น $1.00 \angle 0^\circ$ p.u. หรือใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้าที่พิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบ จะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังไฟฟ้าที่บัสขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (Power mismatches) ซึ่งทั้งสองส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta P_k = P_{sch,k} - P_{cal,k} = f_{p,k} \quad (10)$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} = f_{q,k} \quad (11)$$

โดยที่

$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| V_k V_i |\cos(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k)| \quad (12)$$

$$Q_{cal,k} = -\sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| V_k V_i |\sin(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k)| \quad (13)$$

ใช้ระเบียบวิธีการวนรอบนิวตันราฟสันประมาณผลเฉลยของระบบสมการที่รอบการคำนวณที่ k+1 ใด ๆ จะได้

$$f_{p,k+1} = \Delta P_{k+1} = \Delta P_k + [\nabla f_{p,k}]^T \times \Delta x = 0 \quad (14)$$

โดยที่

$$\Delta P_k = -[\nabla f_{p,k}]^T \times \Delta x \quad (15)$$

เมื่อ $x = [\delta \quad |V|]^T$ นั่นคือ

$$\Delta P_k = -\left[\frac{\partial f_{p,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial f_{p,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \right] \quad (16)$$

เนื่องจาก $P_{sch,k}$ มีค่าคงที่ จะได้ว่า $\frac{\partial f_{p,k}}{\partial x} = -\frac{\partial f_{cal,k}}{\partial x}$ นั่นคือ

$$\Delta P_k = -\frac{\partial P_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (17)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะได้ว่า

$$\Delta Q_k = -\frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (18)$$

สำหรับสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีนิวตันราฟสันได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{cal}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{cal}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (19)$$

นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{h+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^h + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}^h = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^h + \begin{pmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{pmatrix}^{-1(h)} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^h \quad (20)$$

ทำการคำนวณสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน J_1, J_2, J_3, J_4 ,

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (21)$$

ถ้ากำหนดให้ บัสที่ s เป็นบัส-สแล็ก จากสมการข้างบน หลักที่ k=s และ แถวที่ k=s จะถูกกำจัดออกไป เหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น ดังนี้
เมตริกซ์ย่อย J_1

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{j=1, j \neq k}^n |Y_{k,j}| V_k V_j |\sin(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k)| \quad (22)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad ; i \neq k \quad (23)$$

เมตริกซ์ย่อย J_2

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|Y_{k,k} V_k| \cos(\theta_{k,k}) + \sum_{j=1, j \neq k}^n |Y_j V_j| \cos(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (24)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |Y_{k,i} V_k| \cos(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad ; i \neq k \quad (25)$$

เมตริกซ์ย่อย J_3

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{j=1, j \neq k}^n |Y_{k,j} V_k V_j| \cos(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (26)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad ; i \neq k \quad (27)$$

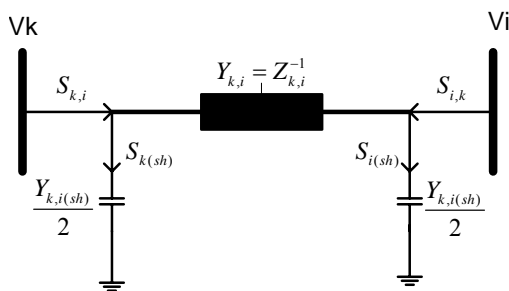
เมตริกซ์ย่อย J_4

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = 2|Y_{k,k} V_k| \sin(\theta_{k,k}) + \sum_{j=1, j \neq k}^n |Y_j V_j| \sin(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (28)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|Y_{k,i} V_k| \sin(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad ; i \neq k \quad (29)$$

การคำนวณปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power mismatch) มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้

เมื่อคำนวณผลเฉลยแรงดันบัสเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งเพื่อดูการกระจายของการไหลของกำลังไฟฟ้า ว่ามีทิศทางไปทางใด และมีปริมาณเท่าใด กำลังงานสูญเสียในสายส่งตลอดจน แรงดันตก คุณสมบัติเหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับกรวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อให้ระบบทำงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและประหยัด



รูปที่ 2 แบบจำลองสายส่งเชื่อมต่อระหว่างบัส k และ i

จากรูปที่ 2 ใช้สูตรการคำนวณสูญเสียของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลในสายส่งจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$S_{k,i}^* = S_{k(sh)}^* + S_{k,i(line)}^* = \frac{1}{2} y_{k,i(sh)} V_k V_k^* + y_{k,i} (V_k - V_i) V_k^* \quad (30)$$

$$S_{k,i}^* = \frac{1}{2} y_{k,i(sh)} |V_k|^2 + y_{k,i} V_k^* (V_k - V_i) = P_{k,i} - Q_{k,i} \quad (31)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$S_{i,k}^* = \frac{1}{2} y_{k,i(sh)} |V_i|^2 + y_{k,i} V_i^* (V_i - V_k) = P_{i,k} - Q_{i,k} \quad (32)$$

กำลังงานไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งในสายคำนวณได้ดังนี้

$$S_{k,i(loss)}^* = S_{k,i}^* + S_{i,k}^* = P_{k,i(loss)} - jQ_{k,i(loss)} \quad (33)$$

3. ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด

3.1 สมการรูปแบบปัญหา

ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดเป็นการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในสถานะคงที่ และเป็นการแก้ปัญหาที่มีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ร่วมกับขอบเขตเงื่อนไขบังคับที่เป็นตัวแปรควบคุม โดยมีรูปแบบทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) \\ \text{Subject to} \quad & g(x) = 0, \text{ equality constraints} \\ & h(x) \leq 0, \text{ inequality constraints} \end{aligned}$$

มีการแปลงเงื่อนไขสมการและอสมการให้เป็นพจน์ปรับโทษและนำไปรวมกับสมการวัตถุประสงค์เดิมจะได้เป็นฟังก์ชันปรับโทษ

$$P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (34)$$

$$\Omega(x) = \rho \{g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2\} \quad (35)$$

โดยที่ $P(x)$ คือ ฟังก์ชันปรับโทษ (Penalty Function)

$\Omega(x)$ คือ เทอมปรับโทษ (Penalty Term)

การใช้วิธีการของการปรับโทษ [8] ทำให้การแก้ปัญหาจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนเป็นฟังก์ชันปรับโทษนี้แทน ซึ่งจะง่ายกว่าและมีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อน

3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายปัญหาที่นิยมนำมาพิจารณา เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในบทความนี้ใช้การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งแสดงในสมการที่ 3

$$F_{loss} = \sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (36)$$

โดยที่ F_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด

N_L คือ จำนวนสายส่งทั้งหมด

V_i คือ ขนาดแรงดันบัสที่ i

δ_i คือ มุมแรงดันบัสที่ i

V_j คือ ขนาดแรงดันบัสที่ j

δ_j คือ มุมแรงดันบัสที่ j

$g_{i,j}$ คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j

3.3 ระบบเงื่อนไขบังคับ

ตัวแปรปรับตั้งในบทความนี้คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายให้กับระบบและเทปหม้อแปลง โดยจะทำการปรับตั้งตัวแปรเหล่านี้เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดและยังคงอยู่ในช่วงขีดจำกัด

ของตัวแปรแต่ละตัว โดยมีตัวแปรที่ต้องควบคุมตามคือ พิกัดการไหล กำลังไฟฟ้าของสายส่ง พิกัดช่วงขนาดแรงดันทุกบัสในระบบ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและอสมการแสดงดังต่อไปนี้

1) เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้า

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} V_i \|V_j\| Y_{i,j} |\cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j)| = 0 \quad (37)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B} V_i \|V_j\| Y_{i,j} |\sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j)| = 0 \quad (38)$$

โดยที่ $P_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส i

$Q_{G,i}$ คือ กำลังรีแอกทีฟผลิตที่บัส i

$P_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i

$Q_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังรีแอกทีฟที่บัส i

Y_{ij} คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j

θ_{ij} คือ มุมแอดมิตแตนซ์บัส i ไปยังบัส j

N_B คือ จำนวนบัสทั้งหมด

2) เงื่อนไขบังคับอสมการเป็นขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการปรับตั้ง

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (39)$$

$$Q_{comp,i}^{\min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{\max} \quad (40)$$

โดยที่ T_i^{\min} คือ ขอบเขตที่ปรับตั้งต่ำสุดตัวที่ i

T_i^{\max} คือ ขอบเขตที่ปรับตั้งสูงสุดตัวที่ i

$Q_{comp,i}^{\min}$ คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟต่ำสุดตัวที่ i

$Q_{comp,i}^{\max}$ คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟสูงสุดตัวที่ i

3.4 กำหนดฟังก์ชันปรับโทษ

ฟังก์ชันปรับโทษเป็นการรวมพจน์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิมกับเทอมปรับโทษที่ได้จากเงื่อนไขบังคับทั้งสมการและอสมการโดยแยกศึกษาดังกรณีต่อไปนี้

กรณีอ้างอิง ไม่มีการปรับตั้งค่าตัวแปรในระบบไฟฟ้า ฟังก์ชันปรับโทษจะได้ตามสมการที่ 41

$$P(x) = F_{loss} \quad (41)$$

กรณีศึกษาที่ 1 ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ ฟังก์ชันปรับโทษจะได้ตามสมการที่ 42

$$P(x) = F_{loss} + \Omega_p + \Omega_v + \Omega_c \quad (42)$$

กรณีศึกษาที่ 2 ปรับตั้งค่าที่ปรับหม้อแปลง ฟังก์ชันปรับโทษจะได้ตามสมการที่ 43

$$P(x) = F_{loss} + \Omega_p + \Omega_v + \Omega_T \quad (43)$$

กรณีศึกษาที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟและปรับปรับตั้งที่ปรับหม้อแปลง ฟังก์ชันปรับโทษจะได้ตามสมการที่ 44

$$P(x) = F_{loss} + \Omega_p + \Omega_v + \Omega_c + \Omega_T \quad (44)$$

โดยที่ $\Omega_p = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} V_i \|V_j\| Y_{ij} |\cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j)| \right\}^2 \quad (45)$

$$\Omega_v = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B} V_i \|V_j\| Y_{ij} |\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)| \right\}^2 \quad (46)$$

$$\Omega_c = \rho \sum_{i=1}^{N_C} \left\{ \max(0, Q_{comp,i} - Q_{comp,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_C} \left\{ \max(0, Q_{comp,i}^{\min} - Q_{comp,i}) \right\}^2 \quad (47)$$

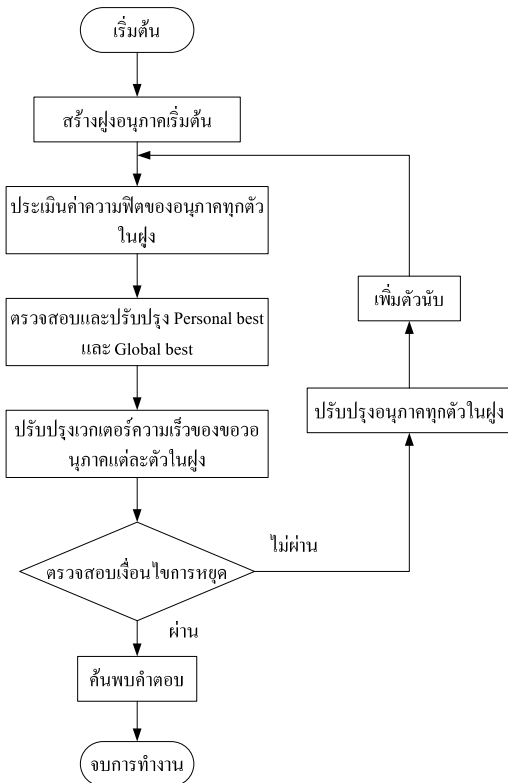
$$\Omega_T = \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i - T_i^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i^{\min} - T_i) \right\}^2 \quad (48)$$

N_C คือ จำนวนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟทั้งหมด

N_T คือ จำนวนหม้อแปลงทั้งหมด

4. วิธีกลุ่มอนุภาค [9]

Kennedy และ Eberhart ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีอนุภาคเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1995 ได้แรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมมารอยู่ร่วมกันพฤติกรรมทางสังคมและพลศาสตร์การเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิต เช่น ฝูงปลา ฝูงนก ฝูงแมลง เป็นต้น ซึ่งวิธีกลุ่มอนุภาคเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด อาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร แต่ละตัวดำเนินการเรียกว่า "อนุภาค" ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ อนุภาคจะรวมกันเป็นกลุ่มบินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา (search space) ระหว่างบินอนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่ง โดยอาศัยตำแหน่งอ้างอิงของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินผ่านมาแล้ว เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจะค้นพบด้วยตัวเองหรืออนุภาคใกล้เคียง มีข้อดีหลายประการ เช่น ใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริธึมน้อย สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก เป็นต้น



รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของการทำงานหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยฝูงอนุภาค กำหนดให้ฝูงอนุภาคที่พิจารณาประกอบด้วยอนุภาคทั้งสิ้น n ตัว อนุภาคแต่ละตัวจะได้รับการปรับปรุงระหว่างกระบวนการวนรอบดังนี้

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{(k+1)} \quad (49)$$

$$v_i^{(k+1)} = v_i^k + \alpha_i(x_i^{lbest} - x_i^k) + \beta_i(x_i^{gbest} - x_i^k) \quad (50)$$

โดยที่ x_i^k คือ อนุภาคซึ่งนำเสนอผลเฉลยตัวที่ i ในรอบการคำนวณที่ k
 v_i^k คือ เวกเตอร์ความเร็วอนุภาคตัวที่ i ในรอบการคำนวณที่ k
 α_i, β_i คือ ตัวสุ่มแบบสม่ำเสมอ (Uniform random) ในช่วง $[0, 1]$
 x_i^{lbest} คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวที่ i ค้นพบ (personal best)
 x_i^{gbest} คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ฝูงอนุภาคค้นพบ (Global best)

5. กระบวนการทำงานของการหาค่าเหมาะสมของกรไหลกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากแบบจำลองโหลดที่บัสต่าง ๆ อยู่ในรูปของโหลดกำลังไฟฟ้า ไม่ใช่โหลดกระแสไฟฟ้า หรือ อิมพีแดนซ์ ดังเช่นโหลดในวงจรเชิงเส้นทั่ว ๆ ไปทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยการใช้วิธีการแบบนิวตันหรือแบบเมฆ ไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้เทคนิคการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขควบคู่ไป ดังนั้นหลักการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมสุดของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า ในการวิจัยนี้จะใช้วิธีการวนรอบแบบนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Iterative Method) มาช่วยในการหาผลเฉลยแรงดันเป็นการหาผลเฉลยโดยประมาณโดยใช้เทคนิคการวนรอบซ้ำแล้วปรับปรุงค่าผลเฉลยจนกว่าผลเฉลยในรอบการคำนวณถัดไปมีค่าอยู่ในเกณฑ์ความผิดพลาดที่ยอมรับได้

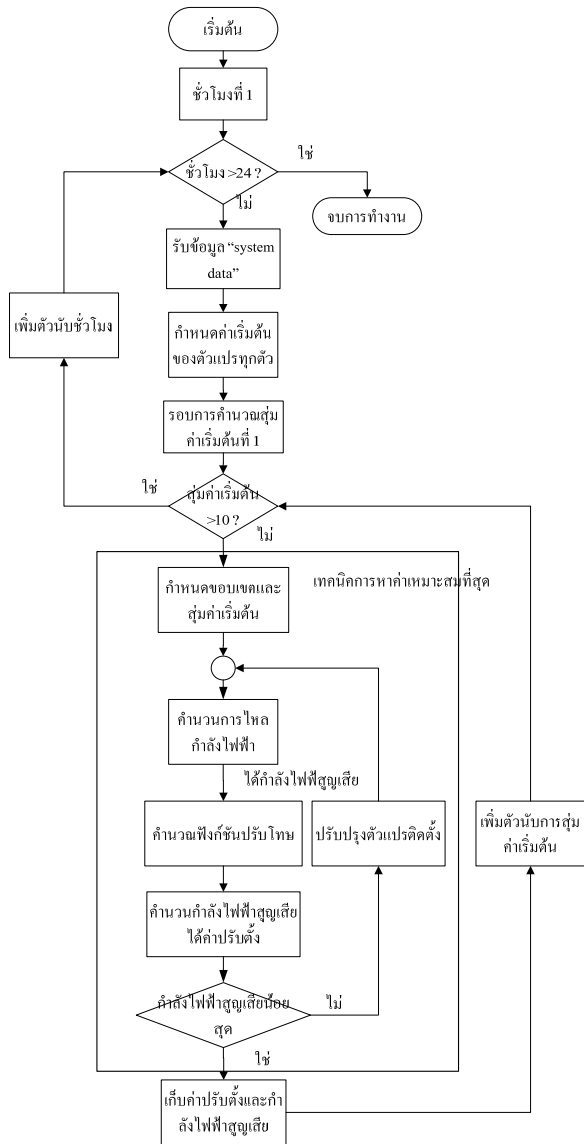
ระบบข้อมูลของโปรแกรม (System data) เป็นการรับค่า parameter ระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาศึกษาประกอบด้วยชุดข้อมูลดังต่อไปนี้

- Busdata : เป็นข้อมูลสำหรับบัสแต่ละบัสประกอบด้วย แรงดันบัส กำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายให้บัสและของโหลดที่ที่บัสจ่ายออกจากบัส และชนิดของบัสว่าเป็น slack bus หรือ โหลดบัส หรือบัสควบคุมแรงดัน
- ldata : เป็นข้อมูลของสายส่งแต่ละเส้นที่เชื่อมในแต่ละบัส ประกอบด้วย ข้อมูลตำแหน่งเชื่อมบัสจากบัส i ไปยังบัส j ข้อมูลของอิมพีแดนซ์สายส่ง, แอตมิตแดนซ์ครึ่งสาย, แทปหม้อแปลงและพิกัดสูงสุดสายส่ง
- MVAbase : ค่าฐานของกำลังไฟฟ้า
- kVbase : ค่าฐานแรงดัน
- Qlimit : ค่าต่ำสุดลีสสูงสุดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้
- n_PV : จำนวนบัสที่เป็นบัสควบคุม
- Vsch : แรงดันบัสเริ่มต้น
- Load : ค่าโหลดใน 1 วัน

ลำดับการทำงานของโปรแกรมการหาค่าที่ป้อนหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายน้อยที่สุด

- ขั้นที่1 : โปรแกรมทำการอ่านเก็บข้อมูลของระบบทั้งหมด คือ system data ณ Load ที่ชั่วโมงที่หนึ่ง
- ขั้นที่2 : โปรแกรมต้องการค่าเริ่มต้นที่ว่าจะเป็นผลเฉลยโดยกำหนดให้แรงดันบัสแต่ละบัสเป็น 1.0 p.u., แทปหม้อแปลง 1.0 p.u และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ VAR=0 โดยที่กำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟเริ่มต้นจากสถานะที่ยังไม่การชดเชยให้แปรค่าไปจนถึงค่าพิกัด
- ขั้นที่3 : คำนวณแรงดันบัสด้วยวิธีของนิวตันราฟสัน ซึ่งจะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ตามมา
- ขั้นที่4 : ใช้ PSO รันเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันปรับโทษเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งมาจากเงื่อนไขบังคับและทำการสุ่มค่าเริ่มต้น 10 ครั้ง และเลือกเอาค่าการติดตั้งที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด
- ขั้นที่5 : เมื่อได้ผลเฉลยกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดและ ค่าติดตั้งต่าง ๆ ทำการเก็บค่าของข้อมูลไว้
- ขั้นที่6 : เริ่มขั้นตอนที่ 1 จนครบ 24 ชุดข้อมูลโหลด ซึ่งเปรียบเทียบกับเป็นการจำลองโหลดใน 1 วัน ที่มีการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ หนึ่งชั่วโมง

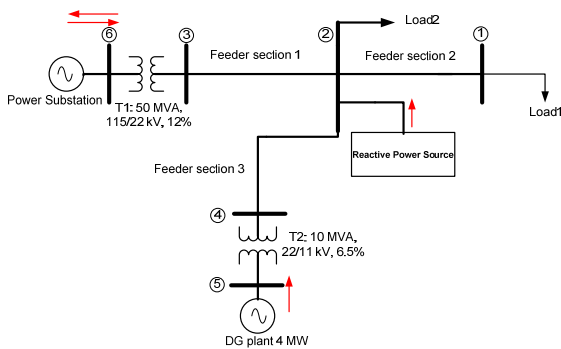
ลักษณะการทำงานของโปรแกรม ตามแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

6. การจำลองและวิเคราะห์ผล

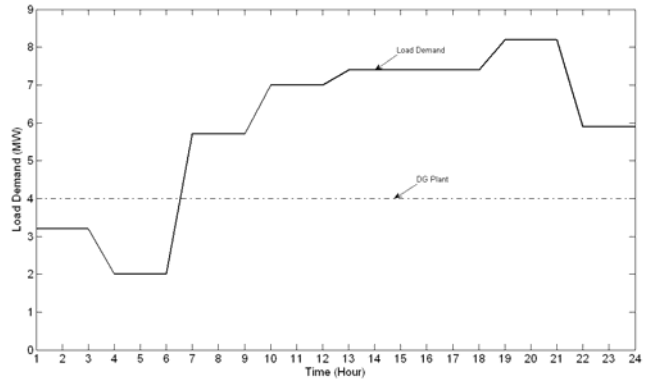
ระบบที่นำมาทดสอบเป็นระบบจำหน่าย 22 kV 6 บัส โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายขนาดกำลังผลิต 4 MW ติดตั้งผ่านหม้อแปลง (T2) จ่ายให้กับระบบผ่านสายส่งที่ 3 (Feeder 3) ดังรูปที่ 1 ทำการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการชดเชยด้วยกำลังไฟฟ้าร์แยกที่ปรับแก้หม้อแปลง และปรับตั้งทั้งสองอุปกรณ์ตามลำดับ



รูปที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังที่นำมาทดสอบ

ทำการจำลองใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB Software) เปลี่ยนค่าโหลดตามความต้องการใน 1 วันตามรูปที่ 6 การแก้ปัญหาการไหล

กำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด โดยมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และมีเงื่อนไขบังคับของตัวแปรควบคุมตามตารางที่ 1 และข้อมูลสายส่งดังตารางที่ 2 โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคในการหาผลเฉลย มีการสุ่มค่าเริ่มต้นแต่ละตัวแปร 10 ครั้ง ดังนั้นจะได้ผลเฉลย 10 คำตอบในแต่ละกรณีต่อหนึ่งชั่วโมง ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละกรณีซึ่งที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 ผลที่ได้ดังตารางที่ 3 และค่าตัวแปรในการปรับตั้งที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยสุดดังตารางที่ 4



รูปที่ 6 ความต้องการการใช้กำลังไฟฟ้า (Daily Load Demand) และกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (DG plant)

ตารางที่ 1 ขอบเขตตัวแปรสำหรับการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด

ตัวแปร	ขอบเขตบังคับ	
	ต่ำสุด	สูงสุด
V1 (p.u.)	0.90	1.10
V2 (p.u.)	0.90	1.10
V3 (p.u.)	0.90	1.10
V4 (p.u.)	0.90	1.10
V5 (p.u.)	0.90	1.10
V6 (p.u.)	0.90	1.10
T1 (p.u.)	0.90	1.10
T2 (p.u.)	0.90	1.10
Qc (MVAR)	0	5

ตารางที่ 2 ข้อมูลของสายส่งสำหรับ 6 บัส ที่ 22 kV, 100 MVA

สายส่งที่	บัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)		แท็ปหม้อแปลง	
		จาก	ไปยัง		
1	1	2	0.2479	0.7438	-
2	2	3	0.1653	0.4959	-
3	2	4	0.124	0.3719	-
4	4	5	0	0.65	1
5	3	6	0	0.24	1

ผลการทดสอบเห็นว่าติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แยกที่ไฟและปรับแก้หม้อแปลงให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ดีที่สุด สามารถลดได้ 40.30% ส่วนติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แยกที่ไฟให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียดีกว่าปรับแก้หม้อแปลงที่สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 27.56% และ 20.48% ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่เหลือในระบบที่จ่ายกลับคืนสู่สถานีไฟฟ้า ติดตั้งทั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์

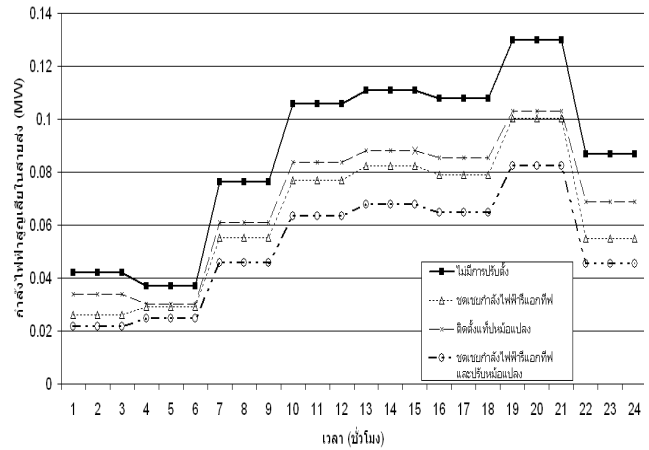
แอกทีฟและปรับแก้พร้อมแปลงให้ค่าดีที่สุดในที่ 8261.10 kWh ส่วนติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้แอกทีฟให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เหลือดีกว่าปรับแก้พร้อมแปลงที่ 8234.10 kWh และ 8208.20 kWh ตามลำดับขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ปรับตั้งตัวแปรในระบบที่ 8162.38 kWh ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่เหลือสามารถไปจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าย่อยอื่น ๆ หรือเก็บพลังงานไว้ใช้ในยามฉุกเฉินได้ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเปรียบเทียบในแต่ละกรณีที่ได้ชัดเจนแสดงในรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 เป็นคุณลักษณะการลู่เข้าของคำตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค การเลือกอุปกรณ์การปรับตั้งในระบบจำหน่ายที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายติดตั้งอยู่ด้วย ต้องคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน ซึ่งบทความนี้ไม่ได้พิจารณา เพียงแต่ให้แนวทางในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเท่านั้น

ตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ผลเฉลยน้อยที่สุดในแต่ละกรณี

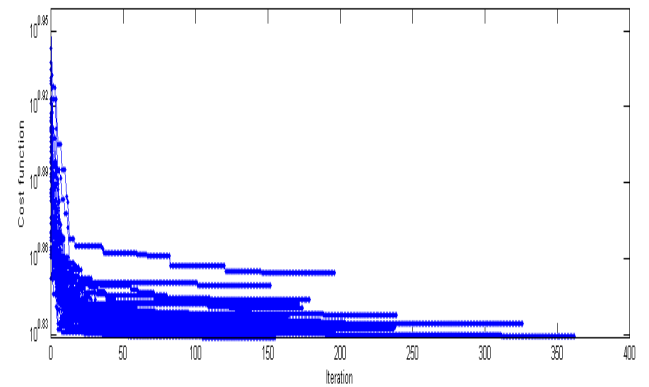
กรณีศึกษา	ไม่มี การปรับตั้ง	กรณีที่ 1 ชดเชย กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ	กรณีที่ 2 ปรับตั้ง แก้พร้อมแปลง	กรณีที่ 3 ชดเชยกำลัง ไฟฟ้แอกทีฟและ แก้พร้อมแปลง
พลังงานสูญเสียทั้งหมด (kWh)	2089.43	1513.50	1661.50	1247.40
ลดพลังงานสูญเสียได้ (%)	-	27.56	20.48	40.30
พลังงานทั้งหมดที่จ่าย คืนสู่สถานีไฟฟ้า (kWh)	8162.38	8234.10	8208.20	8261.10

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรการปรับตั้งที่ก่าำลังสูญเสียน้อยสุด

กรณีศึกษา	ตัวแปรปรับตั้ง	ช่วงเวลา							
		00.00-03.00	03.00-06.00	06.00-09.00	09.00-12.00	12.00-15.00	15.00-18.00	18.00-21.00	21.00-24.00
กรณี ที่ 1	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ (MVAR)	3.05	2.14	3.44	3.98	3.98	4.01	4.03	4.23
กรณี ที่ 2	แก้พร้อมแปลง T1 (p.u.)	0.9026	0.9047	0.902	0.901	0.901	0.9009	0.901	0.9002
	แก้พร้อมแปลง T2 (p.u.)	1.0073	0.9987	1.0097	1.0154	1.0141	1.0156	1.0101	1.0106
กรณี ที่ 3	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ (MVAR)	2.91	2	3.15	3.72	3.8	3.79	3.77	3.91
	แก้พร้อมแปลง T1 (p.u.)	0.9135	0.915	0.9103	0.9092	0.9094	0.9095	0.9095	0.9099
	แก้พร้อมแปลง T2 (p.u.)	0.9749	0.9504	0.9506	0.9224	0.9062	0.9637	0.9451	0.9674



รูปที่ 7 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง



รูปที่ 8 คุณลักษณะการลู่เข้าของคำตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

7. สรุป

บทความนี้เป็นนำเสนอการไหลกำลังไฟฟ้แอกทีฟที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ที่ใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าช่วยสถานีไฟฟ้า และการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ด้วยการชดเชยกำลังไฟฟ้แอกทีฟและการปรับแก้พร้อมแปลง การปรับตั้งจะขึ้นอยู่กับโหลดและพิกัดของเงื่อนไขบังคับ ผลการศึกษาเห็นว่ากรชดเชยกำลังไฟฟ้แอกทีฟและการปรับตั้งแก้พร้อมแปลงสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวเพียงหนึ่งอย่าง และการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้แอกทีฟลดกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าปรับแก้พร้อมแปลง และ การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วยสถานีไฟฟ้าได้ อีกทั้งในช่วงเวลาที่มีโหลดน้อย กำลังไฟฟ้าจะเหลือในระบบส่งผลให้จ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนหรือขายคืนสู่สถานีไฟฟ้าทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าในระบบโดยรวมลดลง

เอกสารอ้างอิง

1. P.F. Ribeiro, B.K. Johnson, M.L. Crow, A. Arsoy and T. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 89, Issue 12, Dec. 2001, pp. 1744 – 1756.

2. E.R. Ramos, J.L. Martinez-Ramos, A.G. Exposito and A.J.U. Salado, "Optimal reconfiguration of distribution networks for power loss reduction", Vol. 3, 10-13 Sept. 2001, pp. 5 .
3. S. Biansoongnem, S. Chusanapiputt and S. Phoomvuthisarn, "Minimization of Transmission Loss with Consideration of Transformer Taps Constraint", TENCON 2005 IEEE Region 10, 21-24 Nov. 2005, pp. 1 - 5.
4. Z. Haibo, Z. Lizi and M. Fanling, "Reactive power optimization based on genetic algorithm", Power System Technology, 1998. International Conference Vol. 2, 18-21 Aug. 1998, pp. 1448 – 1453.
5. G.-W. Moon, "Predictive current control of distribution static compensator for reactive power compensation", Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings, Vol. 146, Issue 5, Sept. 1999, pp. 515 – 520.
6. Y. Bo, C. Yunping, Z. Zunlian and H. Qiye, "Solving Optimal Power Flow Problems with Improved Particle Swarm Optimization", Intelligent Control and Automation, 2006, WCICA 2006. The Sixth World Congress on Vol. 2, pp. 7457 – 7461.
7. ธนัตชัย กุลวรรวานิชพงษ์, "การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง Electric Power System Analysis", SUT 3rd Edition, จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์, พิมพ์ครั้งที่ 1, มกราคม 2551
8. P. Dutta and A. K. Sinha, "Voltage Stability Constrained Multi-objective Optimal Power Flow using Particle Swarm Optimization", Industrial and Information Systems, First International Conference, 8-11 Aug. 2006, pp. 161 – 166.
9. ธนัตชัย กุลวรรวานิชพงษ์, "เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด Optimization Techniques", เอกสารประกอบการสอน, SUT 2nd Edition, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สิงหาคม 2550