บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 4

Proceedings of the 4th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์การจัดสรรโหลดอย่างประหยัดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง

The analysis of Economic load dispatch for a Power system

อานนท์ สิงห์เสถียร[1] สุวัฒน์ เกษี[1] ปิยพัทธ์ อ่อนน้อม[1] สมเกียรติ ทองแก้ว[1]

เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ[1] ณัฐพงศ์ พันธุนะ[1] และ คชพงศ์ สุมานนท์[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

บทความนี้ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการแก้ปัญหาการจัดสรรโหลดอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (แมทแลป) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการโปรแกรมของแมทแลปจะถูกใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์บัส แอดมิตแตนซ์บัส และการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถถูกนำมาใช้แก้ปัญหา B matrix ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ B matrix จะต้องถูกนำมาประเมินพารามิเตอร์สำคัญได้แก่ กำลังสูญเสียของระบบ การจัดสรรอย่างประหยัด และการจ่ายกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะต้องถูกวิเคราะห์บนพื้นฐานของราคาดำเนินการที่เหมาะสมเท่านั้น

คำสำคัญ: จัดสรรโหลดอย่างประหยัด, B matrix

Abstract

This article presents the study of economical load allocation solutions in a power system by using the commercial program (matlab). Especially, the programming of matlab was utilized to analyze the impedance bus, bus admittance, and load flow which can be appropriately solved the B matrix. Moreover, the B matrix must be evaluated the important parameters such as the power loss, the economic load dispatch, and the generative power respectively. However, these parameters are analyzed based on the optimal operating cost only.

Keywords: Economic load dispatch, B matrix

1. บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system) ในปัจจุบัน เป็นระบบที่มีการเพิ่มเทคโนโลยีความอัจฉริยะ (Smart technology) เข้ามามีส่วนร่วมอีกทั้งมีองค์ประกอบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ซับซ้อนสูงมาก อันเนื่องมาจากมีการเชื่อมโยงกันของระบบที่ถูกพิจารณาให้มีเสถียรภาพสูงระหว่าง ระบบการผลิต (Generation system) ระบบส่ง (Transmission system) และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution system) ตามลำดับ

ในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) นั้นมีหลายประเภท แต่ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous machine) ซึ่งสามารถใช้เชื้อเพลิงในการกำเนิดต้นกำลังได้หลากหลายชนิด จึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตต้นกำลังไม่เท่ากัน นอกจากนี้กำลังไฟฟ้า (Electrical power) ที่ถูกผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้า (Power plant) ก็จะถูกส่งจากโรงไฟฟ้าผ่านลานไก (Switch yard) ไปสู่ระบบส่งคือสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (High voltage transmission line) ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันเป็นวงจรข่าย (Network circuit) ตามลำดับ เมื่อกำลังไฟฟ้าจากระบบส่งถูกส่งไปถึงโหลดทางไฟฟ้า (Electrical load) ที่คาดหมายไว้ ก็จะมีการลดระดับแรงดันลงเข้าสู่ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (Distribution transformer)

ดังนั้นระบบส่งจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดทางไฟฟ้า โดยที่โหลดทางไฟฟ้าที่คาดหมายไว้เกือบทั้งหมดจะถูกติดตั้งแบบรวมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งมีระยะห่างจากโรงไฟฟ้าในระดับหลายกิโลเมตร จึงเป็นเหตุผลที่ต้องใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) ในระบบส่งเพื่อลดกำลังสูญเสียในสายส่ง โดยระดับแรงดันไฟฟ้ายิ่งสูงมากเท่าไหร่ ก็จะยิ่งส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงก็จำเป็นต้องออกแบบการฉนวนที่ยิ่งยุ่งยากมากขึ้น นอกจากนี้สายส่งระดับแรงดันสูงยังมีความเสี่ยงกับการถูกฟ้าผ่าเนื่องจากเสาส่งมีความสูงมากในระดับหลายสิบเมตร ซึ่งอาจนำไปสู่เหตุการณ์ความเสี่ยงต่อความล้มเหลวทางไฟฟ้าได้ เช่น กรณีไฟฟ้าดับในจังหวัดทางภาคใต้ในปี 2556 เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นระบบส่งต้องคำนึงถึงความเสถียรภาพ (Stability) ความเชื่อถือได้ (Reliability) และการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Load Dispatch) ซึ่งหมายถึง การกำหนดระดับการจ่ายโหลดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเหมาะสม เพื่อสามารถจ่ายโหลด

รวมของระบบไฟฟ้าโดยมีต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าต่ำที่สุด โดยที่ต้นทุนการผลิตของระบบได้รวมเฉพาะค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงและกำลังสูญเสียในสายส่งของระบบพลังงานไฟฟ้า [1-3]

วิธีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่นิยมใช้งานเป็นอย่างมากในอดีต คือ วิธี Equal incremental cost ซึ่งไม่นำอิทธิพลของกำลังสูญเสียในสายส่งมาพิจารณา แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ ตลอดจนมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปเป็นระยะทางไกลระดับหลายกิโลเมตร จะมีผลทำให้กำลังสูญเสียของสายส่งมีปริมาณสูงและมีผลต่อการวิเคราะห์การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นอย่างยิ่ง [3-7]

ดังนั้นจึงได้มีการศึกษามีการพัฒนาวิธีการใหม่ ๆ โดยนำเอาผลของกำลังสูญเสียมาพิจารณาด้วย เรียกว่าวิธี B-Coefficient หรือ วิธี B-matrix ซึ่งในปัจจุบันการวิเคราะห์จ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธี B-matrix และการไหลกำลัง (Load flow) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข (Numerical method) นั้นมีหลากหลายวิธีและเป็นที่นิยมงานใช้กันทั่วไป

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นบทความฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษาการแก้ปัญหาและสร้างโปรแกรมแสดงการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรอย่างประหยัดบนโปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลป โดยการจัดสรรอย่างประหยัดในบทความฉบับนี้จะใช้วิธี B-matrix ในการวิเคราะห์ ซึ่งจำเป็นต่อการจัดตารางเดินเครื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเป็นขั้นตอนที่ควรทำก่อนเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าต่อไป นอกจากนี้ในระบบไฟฟ้าที่มีการแบ่งเขตการจ่ายโหลดทางไฟฟ้าออกเป็นหลายเขต และถูกเชื่อมโยงกันด้วยสายส่งระดับไฟฟ้าแรงสูง ก็จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้การจัดสรรอย่างประหยัด

2. วิธีการจัดสรรอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกติดตั้งอย่างกระจายตัวออกไปทั่วพื้นที่ต่าง ๆ ตามแหล่งกำเนิดพลังงานที่เหมาะสม จากนั้นจึงมีการเชื่อมโยงถึงกันด้วยสายส่งที่ระดับแรงดันต่าง ๆ โดยการเชื่อมต่อโหลดที่ตำแหน่งต่าง ๆ นั้น อาจจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องมีต้นหรือทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำ แต่ถูกติดตั้งตั้งอยู่ไกลจากโหลดทางไฟฟ้าที่คาดหวัง ซึ่งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระยะไกลหลายกิโลเมตรจะทำให้กำลังสูญเสียในสายส่งเป็นอย่างมาก ดังนั้น การจัดสรรอย่างประหยัดจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขกำลังwaahkสูญเสียในสายส่งเป็นสำคัญ ด้วยเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสมดุลต้องเปลี่ยนไปตามสมการที่ (1)

$$P_{load} + P_{loss} - \sum_{i=1}^{n} P_i = 0 \qquad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ P_{load} คือกำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ส่งจ่ายไปถึงโหลดทางไฟฟ้า, P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ และ P_i คือ กำลังไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ i

จากสมการที่ (1) เมื่อถูกจัดรูปแบบในรูปของสมการลากรานจ์จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2)

$$L = \sum_{i=1}^{n}\left(a_i + b_i P_i + c_i P_i^2\right) + \lambda(P_{load} + P_{loss} - \sum_{i=1}^{n} P_i) \qquad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ โดย λ คือต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงรวมมีหน่วยเป็น บาทต่อเมกะวัตต์*ชั่วโมง, ตัวแปร a_i, b_i, c_i คือค่าสัมประสิทธิ์ในการพิจารณาสมการลากรานจ์

นอกจากนี้การวิเคราะห์หาต้นทุนต่ำสุดของการผลิตจะสามารถหาได้จากการทำอนุพันธ์ย่อยของสมการลากรานจ์คือสมการที่ (2) เทียบกับตัวแปร P_i แต่ละตัวเทียบกับ λ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = b_i + 2c_i P_i + \lambda(\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} - 1) \qquad (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_{loss} + P_{loss} - \sum_{i=1}^{n} P_i \qquad (4)$$

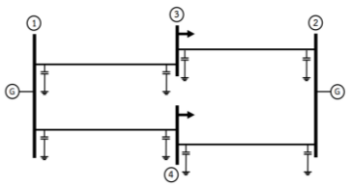
สำหรับการจัดสรรอย่างประหยัดเมื่อคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งมีร่วมพิจารณา ก็จะใช้ผลคูณระหว่างต้นทุนหน่วยสุดท้ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องและตัวคูณปรับแต่ง (L_i) โดยที่กำหนดให้ λ คือต้นทุนในการผลิตกำลังจริงหน่วยถัดไปของระบบที่กำหนดให้ ดังนั้นการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะได้จากจัดรูปสมการใหม่ดังสมการที่ (5)

$$P_i = \frac{1}{2c_i}(\frac{\lambda}{L_i} - b_i) \qquad (5)$$

แต่อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเป็นอย่างมาก ก็ต่อเมื่อมีค่า L_i สูง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าจริง P_i ในสมการที่ (5) มีค่าต่ำลงน้อยกว่าตอนที่ไม่คิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ห่างจากโหลดทางไฟฟ้ามาก ๆ (หลายสิบหรือหลายร้อยกิโลเมตร) จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงในสายส่ง ซึ่งจะทำให้การจัดสรรโหลดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีการผลิตกำลังฟ้าจริงน้อยลงกว่าที่คาดไว้ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของค่า $\partial L/\partial \lambda$ ในสมการที่ (4) เมื่อถูกจัดรูปให้เท่ากับศูนย์ก็จะกลายเป็นเงื่อนไขของกำลังไฟฟ้าสมดุล ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

3. วิธีการคำนวณกำลังสูญเสียโดยใช้ B matrix

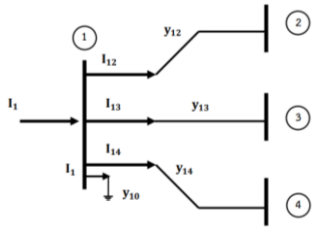
จากรูปที่ 1 สมมติให้ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่สนใจ มีบัสจำนวน 4 บัส และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งเฉพาะที่บัส 1 กับบัส 2 เท่านั้น ส่วนบัส 3 กับบัส 4 มีเฉพาะโหลดทางไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งสามารถเขียนในรูปของการวิเคราะห์วงจรแบบโนด (Node analysis) ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1. ตัวอย่างระบบไฟฟ้าที่จะทำการจัดสรรอย่างประหยัดโดยคำนึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

เมื่อวิเคราะห์วงจรแบบโนด จากวงจรในรูปที่ 2 จะสามารถจัดสมการในรูปของเมทริกซ์ ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ (6) จากสมการที่ (6) จะสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์หากำลังไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ โดยใช้วิธีการไหลกำลัง (Power flow) ซึ่งจะทำให้ทราบกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าลำดับที่ i คือ (P_{gi}) และกำลังไฟฟ้าที่โหลดต่าง ๆ นอกจากนี้จะสามารถวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ (P_{loss}) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ B matrix จากสมการที่ (7) ในการร่วมพิจารณา ซึ่งแสดงให้เห็นถึง P_{loss} ในสมการที่ (8) ถึง (10) โดยที่ NG คือ จำนวนบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อนำสมการที่ (10) มาทำการหาอนุพันธ์เทียบกับ P_{gi} จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (11) ซึ่งสามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ (12)



รูปที่ 2. ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรแบบโนด (กระแสไฟฟ้าเฉพาะที่บัส 1)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \frac{B_{10}}{2} \\ B_{21} & B_{22} & \frac{B_{20}}{2} \\ \frac{B_{10}}{2} & \frac{B_{20}}{2} & B_{00} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$P_{loss} = \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \frac{B_{10}}{2} \\ B_{21} & B_{22} & \frac{B_{20}}{2} \\ \frac{B_{10}}{2} & \frac{B_{20}}{2} & B_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$P_{loss} = B_{11}P_{g1}^2 + 2B_{12}P_{g1}P_{g2} + B_{22}P_{g2}^2 + B_{10}P_{gl} + B_{20}P_{g2} + B_{00} \tag{9}$$

$$P_{loss} = \sum_{i=j}^{NG}\sum_{j=1}^{NG} P_{gi}B_{ij}P_{gj} + \sum_{i=1}^{NG} B_{i0}P_{gi} + B_{00} \tag{10}$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{gi}} = 2B_{ii}P_{gi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{NG} 2B_{ij}P_{gj} + B_{i0} \tag{11}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \left(\frac{2c_i}{\lambda} + 2B_{ii}\right) & 2B_{12} & 2B_{1,NG} \\ 2B_{21} & \left(\frac{2c_2}{\lambda} + 2B_{22}\right) & \dots\ 2B_{2,NG} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2B_{NG,1} & 2B_{NG,2} & \left(\frac{2c_{NG}}{\lambda} + 2B_{NG,NG}\right) \end{bmatrix}}_{LHS\ matrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gNG} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} (1 - B_{10}) - \frac{b_1}{\lambda} \\ (1 - B_{20}) - \frac{b_2}{\lambda} \\ \vdots \\ (1 - B_{NG,0}) - \frac{b_i}{\lambda} \end{bmatrix}}_{RHS\ matrix} \tag{12}$$

จากสมการต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาขั้นต้น จะสามารถนำความสัมพันธ์จากสมการที่ (1) ถึง (12) มาวิเคราะห์การจัดสรรโหลดอย่างประหยัดโดยคำนึงถึงกำลังการสูญเสียในสายส่งแบบประยุกต์ใช้ร่วมกับ B matrix ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: หาค่าโหลดรวม P_{load} จากผลบวกโหลดทุกบัส

ขั้นตอนที่ 2: หาค่า P_{gi} จากวิธีการไหลกำลัง

ขั้นตอนที่ 3: หาค่า B matrix จากสมการที่ (7)

ขั้นตอนที่ 4: ตั้งค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเริ่มต้น ($\lambda^{(0)}$)

ขั้นตอนที่ 5: หา LHS matrix และ RHS matrix ตามความสัมพันธ์ของสมการ (12) และใช้ค่า B matrix ในการร่วมวิเคราะห์

ขั้นตอนที่ 6: หาค่า P_{loss} จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (10)

ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสมดุลในสมการ (1) หากเป็นไปตามเงื่อนไขให้ไปขั้นตอน 7 หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ปรับค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงจำนวนครั้งที่ k, $\lambda^{(k)}$ ดังสมการที่ (13) และ (14) หลังจากวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \tag{13}$$

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\lambda^{(k)} - \lambda^{(k-1)}}{\sum_{i=1}^{NG} P_{gi}^{(k)} - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi}^{(k-1)}} \left[P_{load} + P_{loss}^{(k)} - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi}^{(k)}\right] \tag{14}$$

ขั้นตอนที่ 8: ได้คำตอบเป็นค่า P_{gi} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องและค่ากำลังสูญเสียรวมในสายส่ง P_{loss} ที่เหมาะสมกับการการจัดสรรโหลดอย่างประหยัด

3. การวิเคราะห์จัดสรรอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้า

จากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์สายส่งดังตารางที่ 1 และเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ ระบบไฟฟ้ามีบัสจำนวน 4 บัส และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฉพาะที่บัส 1 กับบัส 2 เท่านั้น ส่วนบัส 3 กับบัส 4 จะมีโหลดทางไฟฟ้าต่ออยู่ โดยโหลดทางไฟฟ้าที่บัส 3 คือ 2.2 + j1.4 p.u. โหลดทางไฟฟ้าที่บัส 4 คือ 2.8 + j1.7 p.u. ตามลำดับ

นอกจากนี้กำหนดให้ค่าในระบบเป็นค่าต่อหน่วย (p.u.) โดยใช้ค่าฐานดังต่อไปนี้ S_{Base} = 100 MVA และ V_{Base}= 230 kV และกำหนดต้นทุนเชื้อเพลิงในการผลิตในฟังก์ชันดังสมการที่ (15) และ (16)

$$F_1(P_{g1}) = 110 + 7P_{g1} + 0.003P_{g1}^2 \ \$, 100 \le P_{g1} \le 400 \text{ MW} \tag{15}$$

$$F_2(P_{g2}) = 110 + 5P_{g2} + 0.004P_{g2}^2 \ \$, 120 \le P_{g1} \le 500 \text{ MW} \tag{16}$$

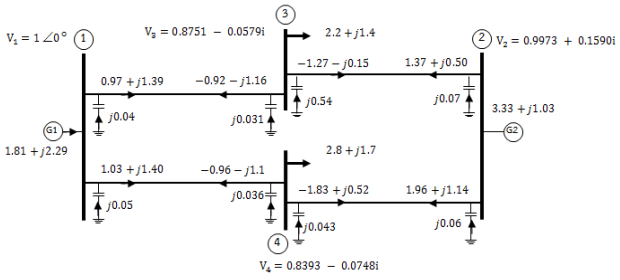
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สายส่งของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

	R (p. u.)	X (p. u.)	Shunt Y (p. u.)
Line 1-3	0.014	0.08	0.08
Line 1-4	0.020	0.10	0.10
Line 2-3	0.048	0.16	0.14
Line 2-4	0.024	0.12	0.12

เมื่อนำค่าค่าพารามิเตอร์สายส่ง และเงื่อนไขทั้งหมดมาวิเคราะห์ดังขั้นตอนที่ 1 ถึง 2 ด้วยวิธีการไหลกำลัง จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ 3 เพื่อหาค่า B matrix ด้วยการเขียนโค้ดในโปรแกรมแมทแลป ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4

ในขั้นตอนที่ 4 ให้กำหนดค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเริ่มต้น ($\lambda^{(0)}$) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 9.4 ดอลลาร์ / เมกะวัตต์ และขั้นตอนที่ 5 จะทำการคำนวณหาค่า LHS matrix และ RHS matrix เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ค่า P_{gi} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง รวมทั้งค่ากำลังสูญเสียรวมในสายส่ง P_{loss} ที่เหมาะสมกับการการจัดสรรโหลดอย่างประหยัด ตามขั้นตอนที่ 6 ถึง 8 ต่อไป

ในวิเคราะห์แบบวนรอบครั้งสุดท้าย (Final iteration) โดยผู้วิจัยกำหนดให้วนรอบจำนวน 2000 ครั้ง จะได้ค่าต้นทุนต่ำที่สุดในการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง (λ) เท่ากับ 9.1836 ดอลลาร์ / เมกะวัตต์ และกำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกำลังสูญเสียที่เหมาะสมต่อการจัดสรรโหลดอย่างประหยัด ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2



รูปที่ 3. ผลลัพธ์การไหลกำลังไฟฟ้าทั้งหมดของระบบที่ทำการวิเคราะห์

```
B_matrix =
    0.0249   -0.0006    0.0011
   -0.0006    0.0204    0.0006
    0.0011    0.0006    0.0004
```

รูปที่ 4. ผลลัพธ์ B matrix ของระบบไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ต้นทุนการผลิต (λ) ต่ำที่สุด, กำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_{g1} และ P_{g2}), กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (P_{loss}) ที่เหมาะสมต่อการจัดสรรโหลดอย่างประหยัด

λ	P_{g1}	P_{g2}	P_{loss}
9.1836	1.9786	3.3476	0.3266

4. สรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอถึงการวิเคราะห์การจัดสรรโหลดอย่างประหยัด ซึ่งมีการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าร่วมด้วย เพื่อหาค่าแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา ซึ่งจะนำมาสู่การค่า B matrix ตามลำดับ โดยค่า B matrix จะสามารถนำมาวิเคราะห์การจัดสรรโหลดอย่างประหยัดโดยคำถึงถึงผลกระทบของค่ากำลังสูญเสียในสายส่งด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเป็นจริงในทางปฏิบัติ

และที่สำคัญที่สุดก็คือ การนำต้นทุนการผลิตมาร่วมวิเคราะห์การจัดสรรโหลดอย่างประหยัด ซึ่งการจัดสรรโหลดอย่างประหยัดนั้นจะต้องมีต้นทุนต่ำที่สุด โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังสามารถจ่ายพลังงานให้ระบบได้อย่างเหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรีของนายสุวัฒน์ เกษี และนายปิยพัทธ์ อ่อนน้อม ซึ่งได้รับการสนับสนุนด้านทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา (สวพ.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] L. K. Kirchmayer, “Economic Operation of Power system” , John Wiley & Son, 1958

[2] B.M. Weedy, “Electrical Power system” , John Wiley & Son, 1972

[3] W. D. Stevenson “Element of Power System Analysis”, Mc Graw-Hill Co., 1982

[4] J. D. Glover, M. S. Sarma and T. O. Overbye, “Power System Analysis and Design” Fourth edition, Thomson corporation.

[5] สมพร สิริสำราญนุกุล, “เอกสารประกอบการสอน วิชา Optimization Techniques” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมกล้าพระนครเหนือ

[6] พิชัย อารี, “การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[7] ชำนาญ ห่อเกียรติ “การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง” โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์