

ขั้นตอนวิธีการไหลกำลังสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มีการพิจารณาอุณหภูมิสายส่ง

Power Flow Algorithm for Electric Power System Considering Transmission Line Temperature

วันวิสาข์ รุ่งจิตต์¹ เชวศักดิ์ รักเป็นไทย^{1*} และ เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์²

Wanwisa Ruenjitt¹ Chawasak Rakpenthai^{1*} and Sermsak Uatrongjit²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Department of Electrical Engineering, School of Engineering,
 University of Phayao, Phayao, 56000, Thailand

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
 Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

*E-mail: chawasak@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีการไหลกำลังสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการพิจารณาการแปรผันอุณหภูมิตัวนำสายส่ง สมการได้ดุลความร้อนของตัวนำสายส่งบนพื้นฐานของสภาพอากาศแวดล้อมและกำลังสูญเสียของสายส่งถูกใช้เพื่อคำนวณอุณหภูมิของตัวนำสายส่ง โดยสมมติให้ข้อมูลสภาพอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิโดยรอบ อัตราเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ สามารถได้มาจากการวัดสภาพอากาศ ตัวแปรสถานะของปัญหาการไหลกำลังประกอบด้วยขนาดแรงดัน บัส มุมเฟส และอุณหภูมิสายส่ง ผลการจำลองบนระบบ IEEE ขนาด 14 บัสและ 118 บัส แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีนำเสนอให้ผลลัพธ์แม่นยำมากกว่าผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีการไหลกำลังดั้งเดิม

ABSTRACT

This paper presents a power flow algorithm for electric power system considering the transmission line conductor's temperature variation. A heat balance equation of line conductor based on weather environment and power loss of line is used to calculate the transmission line temperature. It is assumed that the weather data, i.e. the ambient temperature, the wind speed, the wind direction and the solar radiation, are available from weather measurement. The bus voltage magnitudes, the phase angles, and the transmission line temperatures are the state variables of the power flow problem. Simulation results on the IEEE 14-bus and 118-bus systems indicate that the proposed algorithm provides more accurate results than that obtained by the conventional power flow algorithm.

1. บทนำ

การศึกษาการไหลกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังมักกำหนดให้อุณหภูมิของตัวนำสายส่งมีค่าคงที่ พารามิเตอร์สายส่งที่อุณหภูมิคงที่นั้นจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังซึ่งใช้กระบวนการของนิวตันราฟสัน (Newton

Raphson) [1] ในทางปฏิบัติตัวนำสายส่งจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงขึ้นกับสภาพแวดล้อมรอบตัวนำและปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำสายส่ง [2-4] การวิเคราะห์การไหลกำลังที่ใช้อุณหภูมิคงที่ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิจริงของตัวนำจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่สอดคล้องกับสภาพ

จริงของระบบไฟฟ้ากำลัง กำลังผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์ อาจจะเกินพอหรือไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาระไฟฟ้า กำลังสูญเสียในสายส่งอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนไปมากจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจริง ส่งผลกระทบต่อการวางแผนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสมและปลอดภัย

บทความ [5] ได้นำเสนอวิธีการจำลองสายส่งที่พารามิเตอร์สายส่งขึ้นกับอุณหภูมิ และศึกษาความไวของแบบจำลองสายส่งต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมโดยใช้เทคนิคแบ่งสายส่งออกเป็นช่วงย่อยแล้วประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละส่วน เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสายส่งในกรณีสายส่งมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น การศึกษาได้จำลองระบบแล้วเปรียบเทียบการถ่ายโอนกำลังสูงสุดและการลดทอนแรงดันในสายส่งกรณีที่มีสายส่งเส้นเดียวกันมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการแบ่งส่วนย่อยและการประมาณอุณหภูมิเฉลี่ย และพบว่า ถ้าสายส่งเส้นเดียวกันมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งเส้นแล้ว การคำนวณการไหลกำลังโดยใช้การแบ่งสายส่งออกเป็นช่วงย่อยจะสามารถเพิ่มความแม่นยำของผลการวิเคราะห์การไหลกำลังได้ดีกว่า

ในบทความ [6] ได้นำเสนอวิธีคำนวณการไหลกำลัง ซึ่งรวมการประมาณอุณหภูมิและความต้านทานของสายส่ง เข้ากับสมการการไหล อุณหภูมิของสายส่งจะถูกประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิสภาพแวดล้อมบวกกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกำลังสูญเสียในสาย การหาผลเฉลยสมการการไหลกำลังจะใช้วิธีนิวตันราฟสัน โดยอุณหภูมิสายส่งจะถูกเพิ่มเป็นตัวแปรในปัญหาการไหลกำลัง ในแต่ละรอบการวนซ้ำนั้นความต้านทานของสายส่งจะถูกปรับให้สอดคล้องกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ของสายส่ง แต่กำหนดให้รีแอกแตนซ์ของสายส่งมีค่าคงที่ ผลการจำลองได้เปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีดั้งเดิมซึ่งกำหนดให้สายส่งมีอุณหภูมิกิ่งที่ และพบว่า วิธีนำเสนอจะช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานและกำลังสูญเสียที่ประมาณได้ของสายส่ง

บทความ [7] ได้นำเสนอการไหลกำลังที่เหมาะสมที่สุด (optimal power flow) ที่พิจารณาสภาพอากาศ

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีฟาร์มลม อุณหภูมิสายส่งจะเชื่อมโยงกับค่าความต้านทานและพิกัดสายพลวัต (dynamic line rating) ปัญหาการไหลกำลังเหมาะสมที่สุดมีรูปแบบเป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดไม่เชิงเส้นที่มีเงื่อนไขบังคับ ในการศึกษากำหนดให้ความต้านทานของสายส่งเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงค่าตามอุณหภูมิของตัวนำสายส่ง ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศจะกระทบต่อการจัดสรรพลังงานระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและฟาร์มลม วิธีการที่นำเสนอช่วยปรับปรุงความถูกต้องของการประเมินความต้านทานของสายส่ง และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแบบพลวัตตลอดจนการจัดอันดับความร้อนที่จะเกิดขึ้นในสายส่งได้

บทความนี้เสนอวิธีการวิเคราะห์การไหลกำลังในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาอุณหภูมิตัวนำของสายส่งเป็นตัวแปรเพิ่ม ข้อมูลสภาพแวดล้อมรอบสายส่ง ได้แก่ อุณหภูมิสภาพอากาศ อัตราเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ จะถูกพิจารณาร่วมกับการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาการไหลกำลังพารามิเตอร์อนุกรมของสายส่ง (ความต้านทานและรีแอกแตนซ์) จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสายส่ง จากผลการศึกษาพบว่า วิธีนำเสนอสามารถให้ผลการคำนวณกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกำลังสูญเสียของสายส่งซึ่งแม่นยำกว่าผลการคำนวณจากวิธีดั้งเดิม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พารามิเตอร์สายส่งที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ปกติแล้วผู้ผลิตตัวนำของสายส่งจะให้ข้อมูลตัวนำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลตัวนำและข้อมูลการติดตั้งสายส่งบนเสาไฟฟ้าถูกนำไปใช้ในการคำนวณความต้านทาน รีแอกแตนซ์ อนุกรม และคาปาซิแตนซ์ขนานของวงจรสมมูลสายส่ง ในทางปฏิบัติความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของสายส่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวนำสายส่ง เราสามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของสายส่งและอุณหภูมิของตัวนำได้จาก [5]

$$R_l = R_0 (1 + \tau_r (T_c - T_0)) \quad (1)$$

โดยที่ T_c คือ อุณหภูมิของตัวนำ หน่วย องศาเซลเซียส
 R_0 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ T_0 หน่วย โอห์ม
 R_l คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ T_c หน่วย โอห์ม
 τ_r คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน หน่วยต่อองศาเซลเซียส
 ความสัมพันธ์ระหว่างรีแอกแตนซ์ของสายส่งและอุณหภูมิของตัวนำสามารถคำนวณได้จาก [8]

$$X_l = X_0 (1 + \tau_x (T_c - T_0)) \quad (2)$$

โดยที่ X_0 คือ รีแอกแตนซ์ที่อุณหภูมิ T_0 หน่วย โอห์ม
 X_l คือ รีแอกแตนซ์ที่อุณหภูมิ T_c หน่วย โอห์ม
 τ_x คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของรีแอกแตนซ์ หน่วยต่อองศาเซลเซียส

จากสมการที่ (1) และ (2) จะเห็นได้ว่า ความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อสายส่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะลดลงเมื่อสายส่งมีอุณหภูมิลดลง

แม้ว่าความสูงเฉลี่ยของสายส่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของตัวนำส่งผลให้ค่าปาริแอมิตีร์ของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าปาริแอมิตีร์จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในที่นี้จะสมมติให้ค่าปาริแอมิตีร์ของสายส่งมีค่าคงที่

2.2 สมดุลทางความร้อนของตัวนำ

ขนาดกระแสที่ไหลผ่านสายส่งในสภาวะอยู่ตัวจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของตัวนำและสภาพแวดล้อมรอบตัวนำ ในการศึกษาจะใช้มาตรฐาน IEEE 738 [4] ในการคำนวณสมดุลทางความร้อนของตัวนำสายส่ง ดังนี้

$$I^2 R(T_c) = q_c + q_r - q_s \quad (3)$$

โดยที่ I คือ ค่าประสิทธิผลของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ หน่วย แอมแปร์

$R(T_c)$ คือ ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ หน่วย โอห์มต่อเมตร ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ T_c อุณหภูมิตัวนำ

q_c คือ อัตราสูญเสียการพาความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร

q_r คือ อัตราสูญเสียการแผ่รังสีความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร

q_s คือ อัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์ หน่วย วัตต์ต่อเมตร

อัตราสูญเสียการพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยกลไกภายนอกจะบังคับของไหลให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็ง อัตราสูญเสียการพาความร้อนคำนวณได้ ดังนี้

$$q_c = \max([q_{c1}, q_{c2}, q_{cn}]) \quad (4)$$

ในที่นี้ q_{c1} , q_{c2} และ q_{cn} คือ อัตราสูญเสียการพาความร้อนของความเร็วมต่ำ ความเร็วมสูง และความเร็วมหมุนเวียนธรรมชาติ ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$q_{c1} = 2T_{film} k_f K \left[1.01 + 0.372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] \quad (5)$$

$$q_{c2} = 2.0238 T_{film} k_f K \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \quad (6)$$

$$q_{cn} = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (2T_{film})^{1.25} \quad (7)$$

$$K = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi) \quad (8)$$

$$\rho_f = \frac{1.293 - (1.525 \times 10^{-4}) H_e + (6.379 \times 10^{-9}) H_e^2}{1 + 0.003679 T_{film}} \quad (9)$$

$$T_{film} = \frac{T_c - T_a}{2} \quad (10)$$

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383.4} \quad (11)$$

$$k_f = 2.424 \times 10^{-2} + (7.477 \times 10^{-5}) T_{film} - (4.407 \times 10^{-9}) T_{film}^2 \quad (12)$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ หน่วย มิลลิเมตร

V_w คือ อัตราเร็วของการไหลเวียนอากาศรอบตัวนำ หน่วย เมตรต่อวินาที

T_c คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ หน่วย องศาเซลเซียส

T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม หน่วย องศาเซลเซียส

K คือ ปัจจัยทิศทางลม คำนวณจากสมการที่ (8)

ϕ คือ มุมระหว่างทิศทางลมและแกนของตัวนำ หน่วย องศา

μ_f คือ ความหนืดไดนามิกส์ของอากาศ หน่วย ปาสกาล-วินาที

ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเมตร

k_f คือ การนำความร้อนของอากาศ ณ T_{film} หน่วย วัตต์ต่อ (เมตร-องศาเซลเซียส)

H_e คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของสายส่ง หน่วย เมตร

อัตราสูญเสียการแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนรอบตัวทุกทิศทางโดยไม่อาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน อัตราสูญเสียการแผ่รังสีความร้อน (หน่วยวัตต์ต่อเมตร) คำนวณได้จาก

$$q_r = 0.0178 D \varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

โดยที่ ε คือ การแผ่รังสีความร้อน (0.23 ถึง 0.91)

อัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์

การแผ่รังสีดวงอาทิตย์จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นบนตัวนำของสายส่ง อัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์ (หน่วยวัตต์ต่อเมตร) คำนวณได้จาก

$$q_s^{meas} = \alpha A Q_{solar} \sin(\theta) \quad (14)$$

โดยที่ α คือ การดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ (0.23 ถึง 0.91)

A คือ พื้นที่ฉายของตัวนำต่อหน่วยความยาว หน่วย ตารางเมตรต่อเมตร

θ คือ มุมประสิทธิผลของรังสีดวงอาทิตย์ หน่วย องศา

Q_{solar} คือ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร

3. วิธีการวิเคราะห์การไหลกำลังที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์การไหลกำลังที่พิจารณาอุณหภูมิของตัวนำสายส่งให้เป็นตัวแปรที่ต้องประมาณค่าด้วย ข้อมูลสภาพแวดล้อมรอบสายส่งอาจจะได้มาจากสถานีวัดสภาพอากาศบริเวณใกล้เคียงกับสายส่งหรือจากการทำนายล่วงหน้า รูปที่ 1 แสดงผังงานอย่างง่ายของขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลกำลังที่นำเสนอ สังเกตว่าจะมี 2 ขั้นตอนหลัก คือ (1) การคำนวณการไหลกำลัง และ (2) การปรับอุณหภูมิตัวนำสายส่งแต่ละเส้น โดยใช้เงื่อนไขสมดุลทางความร้อน

แรกเริ่มจะสมมติให้ตัวนำมีอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส แล้วคำนวณการไหลกำลังด้วยวิธีการนิวตันราฟสัน ซึ่งเป็นการหาแรงดันบัสที่จะทำให้สมการที่ (15) เท่ากับศูนย์ แล้วใช้พารามิเตอร์โครงข่ายร่วมกับแรงดันบัสที่ประมาณได้ เพื่อคำนวณหาการไหลกำลังในระบบ [1]

$$g(x) = \begin{bmatrix} P(x) - P_{sch} \\ Q(x) - Q_{sch} \end{bmatrix} \quad (15)$$

โดยที่ x คือ ตัวแปรที่จะประมาณค่า ได้แก่ มุมเฟสและขนาดแรงดันแต่ละบัส ยกเว้นมุมเฟสของบัสอ้างอิง

P_{sch} และ Q_{sch} คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ฉีดเข้าบัส ตามลำดับ

$P(x)$ และ $Q(x)$ คือ ฟังก์ชันหาค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ฉีดเข้าบัส ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้โดยใช้พารามิเตอร์โครงข่ายและ x

ผลเฉลยการไหลกำลังด้วยวิธีการนิวตันกราฟสันจะ
ได้มาจากกระบวนการวนซ้ำสมการที่ (16) และ (17)
จนกระทั่ง $\|g(x^k)\|$ น้อยกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้

$$\Delta x = -G^{-1}g(x^k) \quad (16)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x \quad (17)$$

โดยที่ ตัวยก k คือ รอบการวนซ้ำ k

G คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของ $g(x^k)$

ค่าผลเฉลย x ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกนำไปคำนวณ
กำลังไฟฟ้าและกำลังสูญเสียในสายส่ง ค่ากำลังสูญเสียต่อ
หน่วยความยาว ($P_{loss} = I^2 R(T_c)$) ของสายส่งแต่ละเส้น
และข้อมูลสภาพอากาศรอบสายส่งแต่ละเส้น (อุณหภูมิ
สภาพอากาศ ความเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวง
อาทิตย์) จะถูกนำไปคำนวณอัตราขยายความร้อนจาก
ดวงอาทิตย์ หรือ q_s^{cal} ดังนี้

$$q_s^{cal} = q_c + q_r - I^2 R(T_c) \quad (18)$$

สังเกตว่า q_c และ q_r ในสมการที่ (18) จะได้มา
จากการคำนวณในสมการที่ (4) และ (13)

การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ Q_{solar}^{meas} ซึ่งได้จากการวัดจะถูก
ใช้เพื่อคำนวณอัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์ หรือ
 q_s^{meas} ดังนี้

$$q_s^{meas} = \alpha A Q_{solar}^{meas} \sin(\theta) \quad (19)$$

เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิของตัวนำ วิธีการที่นำเสนอ
จะใช้ผลต่าง $\Delta q = q_s^{meas} - q_s^{cal} = f(T_c)$ มาเป็นฟังก์ชัน
จุดประสงค์ของการหาผลเฉลยด้วยวิธีการนิวตัน เพื่อหา
 T_c ที่จะทำให้ $f(T_c)$ มีขนาดเข้าใกล้ศูนย์ โดยจะถือว่าค่า
 x คงที่ ค่าอุณหภูมิใหม่ที่ประมาณได้จะถูกนำไปใช้
คำนวณพารามิเตอร์อนุกรม (ความต้านทานและรีแอก
แตนซ์) ของสายส่งแล้วคำนวณการไหลกำลังด้วยวิธีการ
นิวตันกราฟสันอีกครั้ง การวนซ้ำทั้ง 2 ขั้นตอนจะสิ้นสุดเมื่อ

อุณหภูมิของตัวนำสายส่งที่ประมาณได้มีการเปลี่ยนแปลง
น้อยมาก (ในที่นี้ใช้เงื่อนไข $\|\Delta T_c\| < 10^{-3}$)

สำหรับผลเฉลยรวมที่ได้จากการวิเคราะห์การไหล
กำลังที่นำเสนอจะเป็นแรงดันบัส มุมเฟส และอุณหภูมิ
ของสายส่งแต่ละเส้น ผลเฉลยจะถูกนำไปใช้คำนวณกำลัง
ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การไหลกำลัง การไหลกระแส
และกำลังสูญเสียในโครงข่ายของระบบ

4. ผลการจำลอง

โปรแกรมวิเคราะห์การไหลกำลังตามวิธีที่นำเสนอ
ได้รับการพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB การ
ทดสอบทั้งหมดดำเนินการบนคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วย
ประมวลผลกลางชนิด Intel® Core™ i5 2.27 GHz
และหน่วยความจำขนาด 6 GB การทดสอบใช้ระบบ
IEEE ขนาด 14 บัส และ 118 บัส ที่ถูกปรับแต่งโดย
สมมติสภาพแวดล้อมรอบ ๆ สายส่ง และอุณหภูมิตัวนำ
สายส่งแต่ละเส้น ข้อมูลสภาพแวดล้อมมีการป้อน
สัญญาณรบกวนที่สัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
การวัด กำหนดให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัด
อุณหภูมิ อัตราเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวง
อาทิตย์ เป็นร้อยละ 5, 5, 10 และ 5 ของค่าที่วัดได้
ตามลำดับ และให้ทั้ง τ_r และ τ_x มีค่าเป็น 0.0039 ต่อ
องศาเซลเซียส ค่าจริงของการไหลกำลังได้มาจากการ
วิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์อนุกรมของสายส่งซึ่งคำนวณ
ณ อุณหภูมิตัวนำแต่ละเส้น

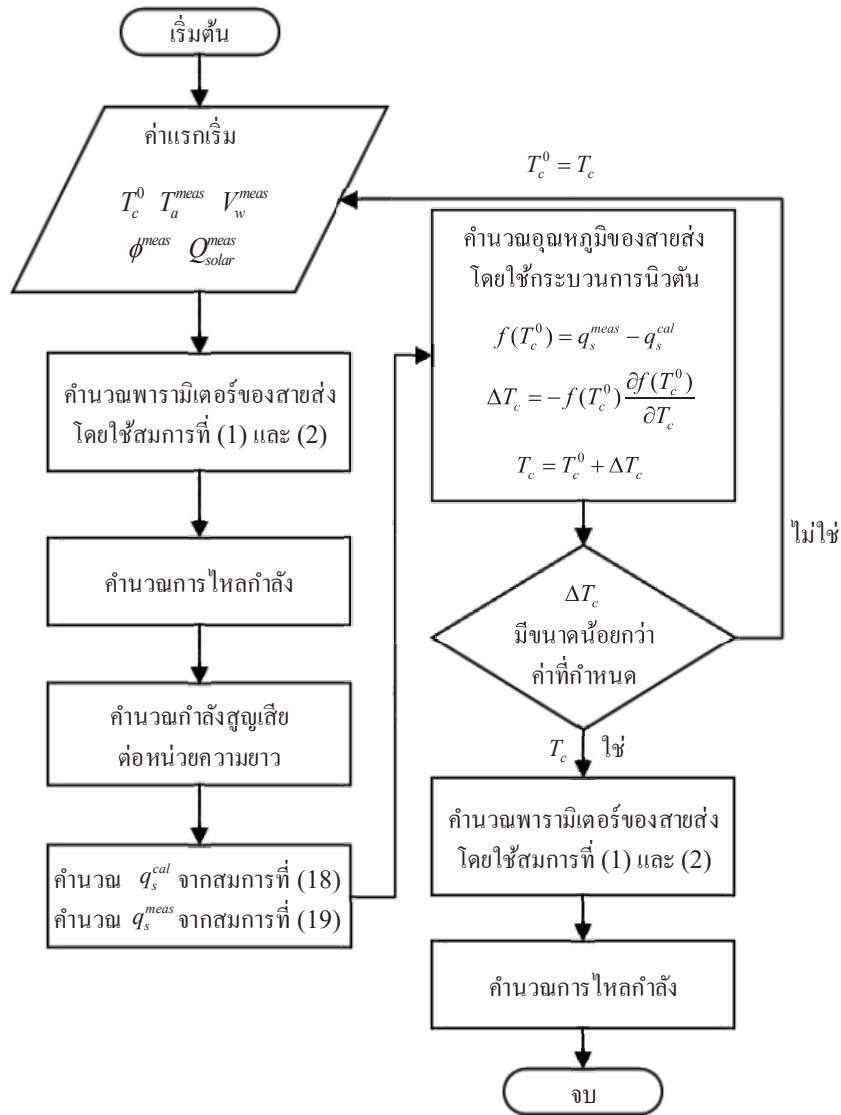
การทดสอบจะเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์การไหล
กำลัง 2 วิธี ดังนี้

วิธีดั้งเดิม: ตัวนำสายส่งแต่ละเส้นมีอุณหภูมิกงที่
เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

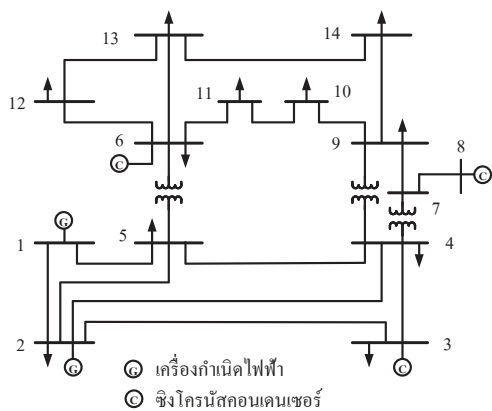
วิธีนำเสนอ: ตัวนำสายส่งแต่ละเส้นมีอุณหภูมิขึ้นอยู่กับ
กำลังสูญเสียในสายส่งและสภาพแวดล้อมโดยรอบ

4.1 ระบบ IEEE ขนาด 14 บัส

ในรูปที่ 2 แสดงแผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ
IEEE ขนาด 14 บัส กำลังผลิตและความผิดพลาดของ
กำลังผลิตที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังที่นำเสนอ



รูปที่ 2 ระบบทดสอบ IEEE ขนาด 14 บัส

ตารางที่ 1 กำลังผลิตที่คำนวณได้

บัส	วิธีดั้งเดิม		วิธีนำเสนอ	
	P	Q	P	Q
1	232.39	-16.89	233.99	-19.50
2	40.00	42.40	40.00	45.39
3		23.40		26.76
6		12.24		13.43
8		17.36		18.01

หมายเหตุ P คือ กำลังจริง หน่วย เมกกะวัตต์

Q คือ กำลังรีแอกทีฟ หน่วย เมกกะวาร์

ตารางที่ 2 ความผิดพลาดของกำลังผลิตที่คำนวณได้

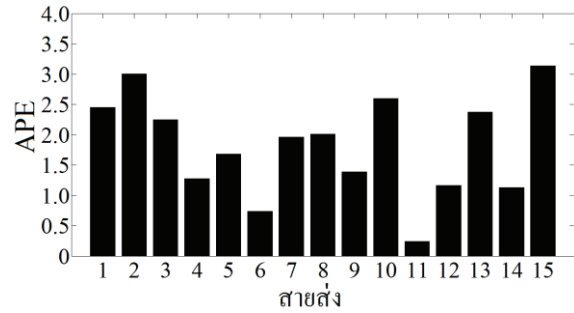
ปี	วิธีดั้งเดิม		วิธีนำเสนอ	
	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>
1	1.531	-2.525	-0.072	0.084
2	0.000	2.941	0.000	-0.050
3		3.180		-0.189
6		1.123		-0.062
8		0.637		-0.031

นอกจากนี้วิธีนำเสนอยังสามารถประมาณค่าอุณหภูมิตัวนำของสายส่งแต่ละเส้น โดยมีค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Absolute of Percentage Error: APE) ของอุณหภูมิตัวนำของสายส่งแสดงดังในรูปที่ 3 สังกัดว่า สำหรับระบบ 14 บัส ซึ่งมีสายส่ง 15 เส้น ความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ได้ภายใต้สภาวะการจำลองจะไม่เกิน 3.5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้จากการจำลองยังพบว่า ถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลวัดสภาพแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ประมาณได้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งของระบบ 14 บัส ซึ่งได้จากวิธีดั้งเดิมและวิธีที่นำเสนอ แสดงดังในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถให้การประมาณกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งแต่ละเส้นได้แม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม กำลังสูญเสียที่ได้จากวิธีนำเสนอมีความผิดพลาดไม่เกิน 1.0 เปอร์เซ็นต์ และความผิดพลาดของขนาดกระแสสายส่งไม่เกิน 0.4 เปอร์เซ็นต์ ขนาดกระแสที่ไหลในสายส่งมีความสำคัญต่อการประเมินความจุทางความร้อนของสายส่งแต่ละเส้น เพื่อให้การไหลกำลังในสายส่งแต่ละเส้นยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขความปลอดภัยในการใช้งานสายส่ง

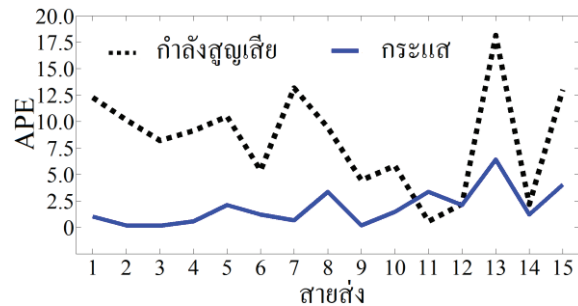
4.2 ระบบ IEEE ขนาด 118 บัส

ระบบ 118 บัสมีสายส่ง 170 เส้น ในรูปที่ 6 แสดงค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุณหภูมิสายส่งในระบบ 118 บัส สังกัดว่า ความผิดพลาดของอุณหภูมิที่คำนวณได้จะไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

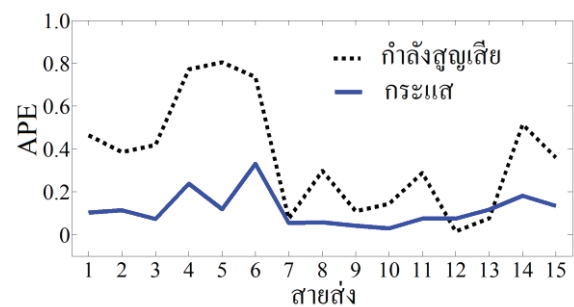


รูปที่ 3 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุณหภูมิสายส่งในระบบ 14 บัส

ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งของระบบ 118 บัส ซึ่งได้จากวิธีดั้งเดิมและวิธีนำเสนอ แสดงดังในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า วิธีนำเสนอสามารถประมาณกำลังสูญเสียและขนาดกระแสที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้นได้อย่างแม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม ในกรณีระบบ 118 บัสนี้วิธีนำเสนอมีความผิดพลาดของกำลังสูญเสียและขนาดกระแสไม่เกิน 5.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

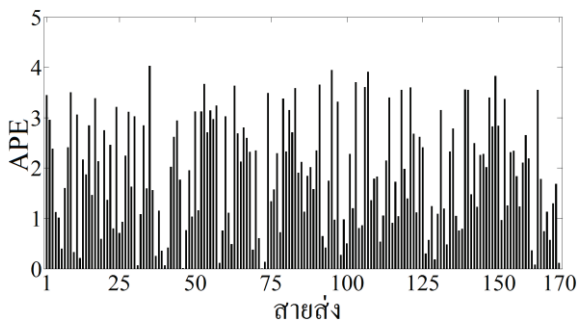


รูปที่ 4 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 14 บัส จากวิธีดั้งเดิม

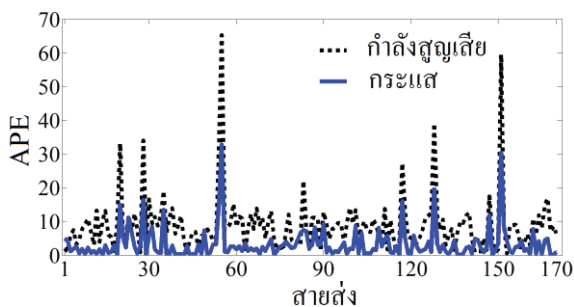


รูปที่ 5 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 14 บัส จากวิธีนำเสนอ

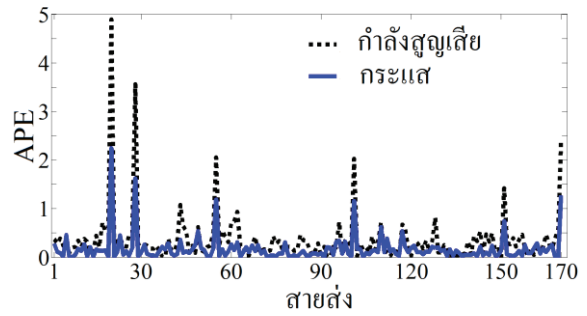
เมื่อพิจารณาเวลาเฉลี่ยในการคำนวณการไหลกำลังพบว่า วิธีดั้งเดิมใช้เวลาเฉลี่ยสำหรับระบบ 14 บัส และ 118 บัส เป็น 0.06 วินาที และ 0.16 วินาที ตามลำดับ ขณะที่ขั้นตอนวิธีนำเสนอใช้เวลาเฉลี่ยสำหรับระบบ 14 บัส และ 118 บัส เป็น 0.12 วินาที และ 0.19 วินาที ตามลำดับ สังเกตว่า ในระบบขนาดเล็กนั้นขั้นตอนวิธีนำเสนอต้องการเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างชัดเจน แต่สำหรับระบบขนาดใหญ่ที่ขั้นตอนวิธีนำเสนอต้องการเวลาในการคำนวณใกล้เคียงกับวิธีดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม วิธีที่นำเสนอสามารถให้ผลการวิเคราะห์การไหลกำลังที่มีความแม่นยำสูงกว่า เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลกำลังจะถูกใช้สำหรับการวางแผนในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้น ความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์จะมีความสำคัญมากกว่าความเร็วในการประมวลผล



รูปที่ 6 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุณหภูมิสายส่งในระบบ 118 บัส



รูปที่ 7 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 118 บัส จากวิธีดั้งเดิม



รูปที่ 8 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 118 บัส จากวิธีนำเสนอ

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การไหลกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาอุณหภูมิตัวนำสายส่งเป็นตัวแปรเพิ่ม และใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมรอบสายส่งมาช่วยในการประมาณค่าอุณหภูมิตัวนำ การศึกษาได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การไหลกำลังระหว่างขั้นตอนวิธีที่มีการพิจารณาอุณหภูมิสายส่งและขั้นตอนวิธีดั้งเดิมที่กำหนดอุณหภูมิสายส่งคงที่

ผลการจำลองบนระบบทดสอบ IEEE ขนาด 14 บัส และ 118 บัส แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์การไหลกำลังที่พิจารณาอุณหภูมิตัวนำสามารถให้การประมาณกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งแต่ละเส้นได้แม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้ กำลังผลิตที่คำนวณได้ก็มีความผิดพลาดต่ำกว่า ดังนั้น หากนำข้อมูลกำลังผลิตที่ได้ไปใช้สั่งการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ กำลังที่ไหลลดได้รับก็ควรจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่ได้วางแผนไว้มากกว่าการใช้ผลการวิเคราะห์จากวิธีดั้งเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RSA5780064 คณะผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Glover, J., Sarma, S., and Overbye, T. Power System Analysis and Design, 5th edition, Cengage Learning, USA, 2011.
- [2] Callahan, P. M., and Douglass, D. A. An experimental evaluation of a thermal line uprating by conductor temperature and weather monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988; 3(4): 1960-1967.
- [3] Douglass, D. A., and Edris, A. A. Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996; 11(3): 1407-1418.
- [4] IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors. IEEE Std. 738-2006, 2007.
- [5] Cecchi, V., Leger, A. St., Miu, K., and Nwankpa, C. Incorporating temperature variations into transmission line models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011; 26(4): 2189-2196.
- [6] Frank, S., Sexauer, J., and Mohagheghi, S. Temperature-dependent power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013; 28(4): 4007-4018.
- [7] Cao, J., Du, W., and Wang, H. F. Weather-based optimal power flow with wind farms integration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016; 31(4): 3073-3081.
- [8] Leger, A. St., and Nwankpa, C. OTA-based transmission line model with variable parameters for analog power flow computation. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2010; 38(2): 199-220.