



การศึกษาเชิงเปรียบเทียบวิธีการประมาณสถานะหนทาง สำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง

Comparative Studies of Robust State Estimation Methods for Electrical Power Systems

คมกฤต เมฆสกุล¹ เซวศักดิ์ รักเป็นไทย² * และ เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์³

Khomkit Meksagul¹, Chawasak Rakpenthai² * and Sermsak Uatrongjit³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

¹Department of Industrial Engineering, School of Engineering, University of Phayao, Phayao, 56000

²Department of Electrical Engineering, School of Engineering, University of Phayao, Phayao, 56000

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200

*E-mail: chawasak.ra@up.ac.th, Tel.: 0-5446-6666, Fax.: 0-5446-6690

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเชิงเปรียบเทียบวิธีการประมาณสถานะหนทาง ได้แก่ วิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด, วิธีกำลังสองคงที่, วิธีกำลังสองเชิงเส้น, วิธีรากกำลังสอง, วิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์ และวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด สำหรับการประมาณระบบไฟฟ้ากำลัง การทดสอบสมรรถนะของการประมาณสถานะหนทางจะใช้ระบบ IEEE 14 บัส และ 57 บัส ข้อมูลการวัดประกอบด้วย การวัดขนาดแรงดัน การไหลกำลัง และการฉีดกำลัง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์คงที่ของฟังก์ชันจุดประสงค์บางประการของการประมาณสถานะหนทางด้วย ผลการเปรียบเทียบการลู่เข้าหาผลเฉลย เวลาการคำนวณ และความแม่นยำในการประมาณสถานะของวิธีเหล่านี้ได้ถูกนำเสนอ

คำสำคัญ: การประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง; การประมาณสถานะหนทาง; ข้อมูลไม่ดี

ABSTRACT

This paper presents the comparative studies of six robust state estimation methods, i.e., least absolute value method, quadratic-constant method, quadratic-linear method, square root method, Schweppe-Huber generalized M method, and maximum exponential square method for power system state estimations. The IEEE 14-bus and 57-bus systems are used to test the performances of the robust estimation methods. The measurement datasets consist of voltage magnitude, power flow, and power injection. In addition, the influence of the constant parameters of objective functions of some robust state estimations

is studied. Comparison results in terms of solution convergence, computation time, and estimation accuracy are presented.

Keywords: power system state estimation; robust state estimation; bad data

1. บทนำ

การประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง (power system state estimation) เป็นการใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรสถานะ (state variables) กับค่าการวัด (measurements) ที่ได้จากระบบกำลัง เพื่อประมาณสถานะของระบบไฟฟ้า ตัวแปรสถานะมักเป็นขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส สำหรับข้อมูลการวัดมักประกอบด้วยขนาดแรงดันบัส การวัดกำลังที่บัส และการไหลกำลังในสายส่ง [1] ในทางปฏิบัติข้อมูลการวัดอาจมีการปนเปื้อนข้อมูลไม่ดี (bad data) อันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของเครื่องวัดและระบบสื่อสารข้อมูล การประมาณสถานะควรสามารถขจัดอิทธิพลของการวัดที่เป็นข้อมูลไม่ดีเหล่านั้นไม่ให้ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของสถานะที่ประมาณได้ แม้ว่าเราอาจระบุการวัดที่จัดเป็นข้อมูลไม่ดีแล้วขจัดการวัดนั้น ในบางกรณีก็อาจไม่สามารถระบุการวัดที่เป็นข้อมูลไม่ดีได้อย่างถูกต้อง [2]

การประมาณสถานะทนทาน (robust state estimation) ถูกออกแบบเพื่อให้สามารถลดผลกระทบจากข้อมูลไม่ดีในระหว่างขั้นตอนการหาผลเฉลยของการประมาณสถานะ [3] ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการประมาณสถานะทนทานหลายวิธี บทความ [4] นำเสนอการประมาณสถานะทนทานแบบวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด (least absolute value) ซึ่งวิธีนี้มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง [5]-[7] อย่างไรก็ตาม วิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดมักใช้เวลาคำนวณนาน นอกจากนี้ในบางครั้งอาจไม่สามารถกรองข้อมูลไม่ดีที่เกิดในตำแหน่งการวัดอิทธิพล (leverage measurements) ซึ่งการวัดอิทธิพลเป็นการวัดที่มีอิทธิพลสูงต่อผลเฉลยที่ได้จากการประมาณสถานะ หากการวัดอิทธิพลให้ข้อมูลการวัดที่มีข้อมูลไม่ดีก็จะส่งผลให้ผลเฉลยที่ได้มีความผิดพลาดสูง [3] ในบทความ [8] ได้นำเสนอการประมาณสถานะทนทานวิธีกำลังสองคงที่ (quadratic-

constant), วิธีกำลังสองเชิงเส้น (quadratic-linear) และวิธีรากกำลังสอง (square root) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถให้ผลเฉลยได้รวดเร็ว บทความ [9] ได้ให้รายละเอียดการพัฒนาอัลกอริทึมของการประมาณสถานะทนทานวิธีกำลังสองคงที่ และวิธีกำลังสองเชิงเส้น บทความ [10] ได้นำเสนอการประมาณสถานะทนทานวิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์ (Schweppe-Huber generalized-M) ที่อาศัยการถ่วงน้ำหนักใหม่ซ้ำ (iterative re-weight) ในการหาผลเฉลย โดยค่าน้ำหนักของการวัดจะถูกปรับปรุงบนพื้นฐานสถิติการฉาย (projection statistics) ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เพื่อลดผลกระทบของการวัดอิทธิพล บทความ [11] ได้นำเสนอการประมาณสถานะทนทานแบบวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด (maximum exponential square) ซึ่งถูกออกแบบให้ฟังก์ชันจุดประสงค์มีความสามารถในการจัดการวัดที่ห่วยเหลือ (residual) ขนาดใหญ่ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อสถานะที่ประมาณได้ เนื่องจากการประมาณค่าสถานะทนทานวิธีต่าง ๆ ที่มีการนำเสนอเหล่านี้อาจมีสมรรถนะในการกรองข้อมูลไม่ดีรวมทั้งความเชื่อถือได้แตกต่างกัน จึงควรมีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบภายใต้สถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังจริง ในบทความ [12]-[15] ได้รายงานผลลัพธ์การเปรียบเทียบสมรรถนะการประมาณสถานะทนทานบางวิธี

บทความนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของการประมาณสถานะทนทาน 6 วิธี คือ วิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด วิธีกำลังสองคงที่ วิธีกำลังสองเชิงเส้น วิธีรากกำลังสอง วิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์ และวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด การศึกษาใช้ระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐานของ IEEE 14 บัส และ 57 บัส ภายใต้สภาวะการมีและไม่มีข้อมูลไม่ดีในระบบการวัด

2. แบบจำลองการวัด

ในการประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลังจะมีการสร้างแบบจำลองการวัด ซึ่งอาศัยข้อมูลพารามิเตอร์ของโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังและค่าการวัดจากการวัดที่มีการติดตั้งในระบบ เพื่อแสดงฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะที่ต้องการประมาณค่ากับค่าการวัด แบบจำลองการวัดจะประกอบด้วยสมการการวัดของการวัดชนิดต่าง ๆ ที่มีการพิจารณาให้อยู่ในระบบการวัด ปกติแล้วทุกการวัดที่มีการติดตั้งในระบบการวัดมักถูกใช้ในการสร้างสมการการวัดของการประมาณสถานะในระบบไฟฟ้ากำลัง แบบจำลองการวัดจะถูกใช้ในการหาผลเฉลยด้วยวิธีการประมาณสถานะวิธีการต่าง ๆ เราสามารถเขียนแบบจำลองการวัดไม่เชิงเส้นของการประมาณสถานะได้ ดังนี้

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (1)$$

โดยที่

z คือ เวกเตอร์ของค่าการวัด ได้แก่ขนาดแรงดันบัส การวัดกำลัง และการไหลกำลัง

x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะที่จะถูกประมาณค่าได้แก่ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส

$h(x)$ คือ ฟังก์ชันการวัด

ε คือ เวกเตอร์ของความผิดพลาดการวัด

2.1 ขนาดแรงดันบัส

ขนาดแรงดันบัสที่วัดได้ V_i^{meas} จากการวัดจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันบัสที่ประมาณได้ V_i และความผิดพลาดในการวัด ε_{V_i}

เราสามารถเขียนสมการการวัดของขนาดแรงดันได้ดังนี้

$$V_i^{meas} = V_i + \varepsilon_{V_i} \quad (2)$$

โดยที่

V_i^{meas} คือ ค่าการวัดขนาดแรงดันบัส

V_i คือ ตัวแปรสถานะแรงดันบัสที่ถูกประมาณค่า

ε_{V_i} คือ ความผิดพลาดของการวัดขนาดแรงดัน

2.2 การวัดกำลังไฟฟ้าที่บัส

การวัดกำลังไฟฟ้าที่ บัสจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของสายส่ง และหม้อแปลงที่เชื่อมโยงกับบัส นั้น ๆ ปกติแล้วพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังมักถูกเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์บัสของระบบ $\bar{Y} = Y \angle \theta$

ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการการวัดของการวัดกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่บัส i ได้ดังนี้

$$P_i^{meas} = \sum_{n=1}^N V_i V_n Y_{in} \cos(\delta_n - \delta_i + \theta_{in}) + \varepsilon_{P_i} \quad (3)$$

$$Q_i^{meas} = \sum_{n=1}^N V_i V_n Y_{in} \sin(\delta_n - \delta_i + \theta_{in}) + \varepsilon_{Q_i} \quad (4)$$

โดยที่

P_i^{meas} คือ ค่าการวัดของกำลังจริงที่บัส i

Q_i^{meas} คือ ค่าการวัดกำลังรีแอกทีฟที่บัส i

V_i, V_n คือ ขนาดของแรงดันบัส i และ n ตามลำดับ

δ_i, δ_n คือ มุมเฟสของแรงดันบัส i และ n ตามลำดับ

Y_{in} คือ ขนาดของแอดมิตแตนซ์ แถว i และสดมภ์ n ของเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์บัส

θ_{in} คือ มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์ แถว i และสดมภ์ n ของเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์บัส

$\varepsilon_{P_i}, \varepsilon_{Q_i}$ คือ ความผิดพลาดของการวัดการวัดกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ตามลำดับ

2.3 การไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

การไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งสามารถคำนวณได้โดยอาศัยพารามิเตอร์ของสายส่งและเฟสเซอร์แรงดันระหว่างบัสที่สายส่งต่อเชื่อมอยู่

เราสามารถเขียนสมการการวัดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลระหว่างบัส i และ j ได้ตั้งสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$P_{ij}^{meas} = V_i^2 [Y_{se} \cos \theta_{se} + Y_{sh} \cos \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{se}) + \varepsilon_{P_{ij}} \quad (5)$$

$$Q_{ij}^{meas} = V_i^2 [Y_{se} \sin \theta_{se} + Y_{sh} \sin \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{se}) + \varepsilon_{Q_{ij}} \quad (6)$$

โดยที่

P_{ij}^{meas} คือ ค่าการวัดของกำลังจริงที่ไหลระหว่างบัส i และ j

Q_{ij}^{meas} คือ ค่าการวัดของกำลังรีแอกทีฟที่ไหลระหว่างบัส i และ j

V_i, V_j คือ ขนาดของแรงดันบัส i และ j ตามลำดับ

δ_i, δ_j คือ มุมเฟสของแรงดันบัส i และ j ตามลำดับ

Y_{se}, Y_{sh} คือ ขนาดของแอดมิตแทนซ์อนุกรมและแอดมิตแทนซ์ขนานของสายส่ง ตามลำดับ

θ_{se}, θ_{sh} คือ มุมเฟสของแอดมิตแทนซ์อนุกรมและแอดมิตแทนซ์ขนานของสายส่ง ตามลำดับ

$\varepsilon_{P_{ij}}, \varepsilon_{Q_{ij}}$ คือ ความผิดพลาดของการวัดกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง ตามลำดับ

3. การประมาณสถานะทันทาน

หัวข้อนี้ให้รายละเอียดการประมาณสถานะทันทานวิธีการต่าง ๆ ที่มีการศึกษาเปรียบเทียบกับสมรรถนะในบทความนี้

3.1 วิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด

การประมาณสถานะวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดมีฟังก์ชันจุดประสงค์ ดังนี้

$$\min \sum_{i=1}^m |r_i| \quad (7)$$

โดยที่

m คือ จำนวนการวัด

$r_i = z_i - h_i(x)$ คือ ส่วนตกค้างของการวัด i

เราสามารถหาผลเฉลยของการประมาณสถานะวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดได้ด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักใหม่ซ้ำ [5] และผลเฉลยจะได้อาจมาจากการวนซ้ำสมการต่อไปนี้

$$H^T R^{-1} Q H \Delta x = H^T R^{-1} Q r^k \quad (8)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x \quad (9)$$

โดยที่

ด้วย k คือ รอบการวนซ้ำที่ k

ด้วย T คือ การสลับเปลี่ยนของเมทริกซ์

R คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของการวัด

H คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของ $h(x)$

Q คือ เมทริกซ์น้ำหนัก มินิยาม ดังนี้

$$Q_{ii} = (\sigma_i^2 / r_i) \text{sign}(r_i) \quad (10)$$

ในที่นี้ σ_i คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัด i

3.2 วิธีกำลังสองคงที่

การประมาณสถานะวิธีกำลังสองคงที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์ ดังนี้

$$\min \sum_{i=1}^m p(r_i) = \begin{cases} r_i^2 / \sigma_i^2 & ; |r_i / \sigma_i| \leq c \\ c^2 / \sigma_i^2 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (11)$$

โดยที่ c เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้เหมาะสม

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (11) ได้ด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักใหม่ซ้ำ [5] และจะได้ผลเฉลยจากสมการที่ (8) และ (9) อย่างไรก็ตาม กรณีวิธีกำลังสองคงที่เมทริกซ์ Q จะถูกนิยามโดย

$$Q_{ii} = \begin{cases} 2 / \sigma_i^2 & ; |r_i / \sigma_i| \leq c \\ 0 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (12)$$

3.3 วิธีกำลังสองเชิงเส้น

การประมาณสถานะวิธีกำลังสองเชิงเส้นมีฟังก์ชันจุดประสงค์ ดังนี้

$$\min \sum_{i=1}^m p(r_i) = \begin{cases} r_i^2 / \sigma_i^2 & ; |r_i / \sigma_i| \leq c \\ 2c\sigma_i |r_i| - c^2 \sigma_i^2 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (13)$$

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (13) ได้ด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักใหม่ซ้ำ [5] และจะได้ผลเฉลยจากสมการที่ (8) และ (9) อย่างไรก็ตาม กรณีวิธีกำลังสองเชิงเส้น เมทริกซ์ Q จะถูกนิยามโดย

$$Q_{ii} = \begin{cases} 2 / \sigma_i^2 & ; |r_i / \sigma_i| \leq c \\ 2(c\sigma_i) \text{sign}(r_i) & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (14)$$

3.4 วิธีรากกำลังสอง

การประมาณสถานะวิธีรากกำลังสองมีฟังก์ชันจุดประสงค์ ดังนี้

$$\min \sum_{i=1}^m p(r_i) = \begin{cases} r_i^2 / \sigma_i^2 & ; |r_i / \sigma_i| \leq c \\ 4c^{3/2} \sqrt{|r_i| / \sigma_i} - 3c^2 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (15)$$

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (15) ได้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักใหม่ซ้ำ [5] และจะได้ผลเฉลยจากสมการที่ (8) และ (9)

อย่างไรก็ตาม กรณีวิธีรากล้างสอง เมทริกซ์ Q จะถูกนิยามโดย

$$Q_{ii} = \begin{cases} 2/\sigma_i^2 & ; |r_i/\sigma_i| \leq c \\ \sqrt{c^3/\sigma_i|r_i|} & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (16)$$

3.5 วิธีการวิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์

การประมาณสถานะวิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์ มีฟังก์ชันจุดประสงค์ ดังนี้

$$\min \sum_{i=1}^m p(r_i) = \begin{cases} r_i^2/2\sigma_i^2 & ; |r_i/\sigma_i\omega_i| \leq c \\ c\omega_i|r_i/\sigma_i| - c^2/2\omega_i^2 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (17)$$

โดยที่ ω_i คือ ค่าน้ำหนักในการวนซ้ำ

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (17) ได้ด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักใหม่ซ้ำ ตามที่ได้อธิบายในบทความ [10] และจะได้ผลเฉลยจากสมการที่ (8) และ (9) โดยเมทริกซ์ Q จะถูกนิยาม ดังนี้

$$Q_{ii} = \begin{cases} 1.0 & ; |r_i/\sigma_i\omega_i| \leq c \\ (c\sigma_i\omega_i/r_i)sign(r_i/\sigma_i\omega_i) & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (18)$$

ค่าน้ำหนัก ω_i ต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อขจัดผลกระทบของการวัดอิทธิพลใดที่มีอยู่ในระบบการวัด ในที่นี้ ω_i สามารถคำนวณได้จาก

$$\omega_i = \min \{1, (x_{v,1-\alpha}^2/PS_i)^2\} \quad (19)$$

โดยที่

$\chi_{v,p}^2$ คือ การแจกแจงไคกำลังสอง (chi-square distribution)

v คือ องศาเสรี (degree of freedom) ซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนสมาชิกที่ไม่เป็นศูนย์ในแถวที่ i ของ H

PS_i คือ สถิติการฉาย [10] ของการวัด i

3.6 วิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด

การประมาณสถานะวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด มีฟังก์ชันจุดประสงค์ ดังนี้

$$\max \sum_{i=1}^m \omega_i \exp\left(-\frac{r_i^2}{2c^2}\right) \quad (20)$$

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (20) ได้จาก

$$H^T\Psi[I - \Phi]H\Delta x = H^T\Psi r \quad (21)$$

ในที่นี้ I คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ Ψ คือ เมทริกซ์ทแยงมุม และ Φ คือ เมทริกซ์ทแยงมุม ซึ่งสมาชิกตัวที่ i มีนิยาม ดังนี้

$$\Phi_{ii} = ((z_i - h_i(x))/c)^2 \quad (22)$$

ในแต่ละรอบการวนซ้ำ ค่า c จะต้องถูกปรับให้มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามค่า c จะต้องไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นในขั้นตอนการหาผลเฉลยของการประมาณสถานะวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด จะกำหนดค่าสูงสุด ต่ำสุด และการเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบการวนซ้ำของค่า c ด้วย

4. ผลการจำลอง

การประมาณสถานะทันทานถูกพัฒนาขึ้นบนโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) และดำเนินการทดสอบบนคอมพิวเตอร์ ทำงานที่ 1.60 กิกะเฮิรตซ์ และหน่วยความจำหลัก 4 กิกะไบต์ กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในการลู่อู่เข้าหาผลเฉลยเชิงตัวเลขเป็น 10^{-4} และรอบการวนซ้ำสูงสุดเป็น 100 รอบ

การทดสอบใช้ระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส และ 57 บัส [16] ข้อมูลการวัดประกอบด้วยการวัดขนาดแรงดัน การวัดการผิดกำลัง และการวัดการไหลกำลัง สมมติให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดแต่ละประเภทเป็น 0.004, 0.010 และ 0.008 ต่อหน่วย ตามลำดับ ค่าการวัดมีการปนเปื้อนของสัญญาณรบกวนที่มีการแจกแจงเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์ที่สัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัด การศึกษาจะเปรียบเทียบสมรรถนะของการประมาณสถานะทันทาน 6 วิธี ดังนี้

- วิธีที่ 1: วิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด
- วิธีที่ 2: วิธีกำลังสองคงที่
- วิธีที่ 3: วิธีกำลังสองเชิงเส้น
- วิธีที่ 4: วิธีรากล้างสอง

วิธีที่ 5: วิธีเอ็มทั่วไป ขวบปี-ฮูเบอร์

วิธีที่ 6: วิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด

การศึกษาจะดำเนินการทดสอบการประมาณสถานะทั้งในกรณีไม่มีข้อมูลไม่ติ และกรณีที่มีข้อมูลไม่ติเกิดขึ้นในการวัด การทดสอบข้อมูลไม่ติกระทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าการวัดแบบสุ่มในช่วง 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

ในบทความ [9] ได้เสนอให้ช่วงแรกของการวนซ้ำหาผลเฉลยของการประมาณสถานะทันทวนวิธีกำลังสองคงที่ และวิธีกำลังสองเชิงเส้นควรกำหนดค่า c ให้มีค่าสูง เพราะส่วนตกค้างที่คำนวณได้ยังมีค่าสูง แต่ในรอบการวนซ้ำถัดไปเมื่อส่วนตกค้างที่คำนวณได้มีค่าลดลงก็ควรกำหนดค่า c ให้มีค่าลดลงด้วย เพื่อให้การประมาณสถานะทันทวนได้กรองข้อมูลที่สงสัยว่าเป็นข้อมูลไม่ติออกไป ดังนั้นในบทความนี้ การหาผลเฉลยของการประมาณสถานะวิธีที่ 2 ถึงวิธีที่ 5 นั้น ในช่วง 2 รอบแรกของการวนซ้ำเราจะกำหนดค่า c ในฟังก์ชันจุดประสงค์ของการประมาณสถานะทันทวนให้เท่ากับขนาดสูงสุดของส่วนตกค้างนอร์มัลไลซ์ (normalized residual) ทั้งนี้เพราะผลเฉลยที่ได้จากการวนซ้ำรอบแรก ๆ จะยังคงให้ตกค้างค่าสูง ตั้งแต่การวนซ้ำรอบที่สามเป็นต้นไป เราจะกำหนดค่า c ให้มีค่าต่ำ ๆ เพื่อให้การประมาณสถานะทันทวนเหล่านั้นทำการกรองข้อมูลไม่ติออกไป

จากการทดสอบเพื่อให้การประมาณสถานะทันทวนสามารถลู่อู่เข้าหาผลเฉลยได้ทุกรอบการจำลอง เราได้กำหนดค่า c ในการวนซ้ำรอบตั้งแต่รอบที่สามของการประมาณสถานะทันทวนวิธีที่ 2 ถึงวิธีที่ 5 ของการทดสอบในระบบ IEEE 14 บัส มีค่าเป็น 3, 3, 12, และ 3 ตามลำดับ และกำหนดค่า c ในการวนซ้ำรอบตั้งแต่รอบที่สามของการประมาณสถานะทันทวนวิธีที่ 2 ถึงวิธีที่ 5 ของการทดสอบในระบบ IEEE 57 บัส มีค่าเป็น 5, 5, 12, และ 4 ตามลำดับ สำหรับการประมาณสถานะทันทวนวิธีที่ 6 ได้กำหนดค่า c เป็น 10 และกำหนดค่าต่ำสุดและการเปลี่ยนแปลงของค่า c เป็นร้อยละ 2 และ 5 ของค่า c

เนื่องจากการหาค่าน้ำหนัก ω_i ของการประมาณสถานะทันทวนวิธีที่ 5 จะใช้เวลาคำนวณนาน เราจึงปรับปรุงความเร็วในการหาผลเฉลยของการประมาณสถานะทันทวน

วิธีที่ 5 ด้วยการคำนวณค่าน้ำหนัก ω_i เฉพาะในรอบแรกของการวนซ้ำเท่านั้น [10]

เพื่อเปรียบเทียบความผิดพลาดของค่าสถานะที่ประมาณได้ เราจะกำหนดตัวชี้วัด ดังนี้

$$\Delta V_{avg} = \frac{1}{n_M} \sum_{m=1}^{n_M} \frac{1}{n_b} \|\Delta V^m\|^2 \quad (23)$$

$$\Delta \theta_{avg} = \frac{1}{n_M} \sum_{m=1}^{n_M} \frac{1}{n_b} \|\Delta \theta^m\|^2 \quad (24)$$

โดยที่

ΔV^m คือ ความผิดพลาดของแรงดัน

$\Delta \theta^m$ คือ ความผิดพลาดของมุมเฟส

ΔV_{avg} คือ ความผิดพลาดเฉลี่ยของแรงดัน

$\Delta \theta_{avg}$ คือ ความผิดพลาดเฉลี่ยของมุมเฟส

n_b คือ จำนวนบัส

n_M คือ จำนวนรอบของการจำลองมอนติคาร์โล

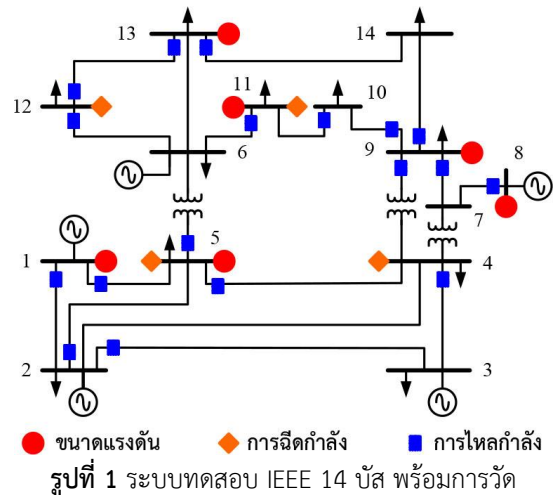
4.1 ระบบ IEEE 14 บัส

ในหัวข้อนี้เราจะดำเนินการทดสอบการประมาณสถานะทันทวนด้วยระบบ IEEE ขนาด 14 บัส ที่มีการติดตั้งการวัดแสดงดังรูปที่ 1 โดยจะทำการทดสอบใน 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1: ไม่มีข้อมูลไม่ติ

กรณีที่ 2: มีข้อมูลไม่ติเกิดขึ้นที่การวัดการไหลกำลังบนสายส่ง 2-3 และ 9-14 ซึ่งไม่ใช่การวัดอิมพีแดนซ์

กรณีที่ 3: มีข้อมูลไม่ติเกิดขึ้นที่การวัดอิมพีแดนซ์ คือ การวัดกำลังที่บัส 4 และการไหลกำลังบนสายส่ง 2-5



ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 กรณี ของระบบ IEEE 14 บัส เมื่อใช้การทดสอบมอนติคาร์โล 500 รอบ จากผลลัพธ์ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ในกรณีไม่มีข้อมูลไม่ดี การประมาณสถานะทันทานทุกวิธีจะให้ความผิดพลาดเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยการประมาณสถานะทันทานวิธีที่ 1 แต่ต้องการรอบการวนซ้ำมากกว่าและยังใช้เวลาคำนวณหาผลเฉลยนานกว่าการประมาณสถานะทันทานวิธีการอื่น ๆ

เมื่อมีข้อมูลไม่ดีเกิดขึ้น การประมาณสถานะทันทานวิธีที่ 1 ถึง วิธีที่ 5 จะต้องการรอบการวนซ้ำเพิ่มขึ้น โดยในกรณีมีข้อมูลไม่ดีที่ไม่ใช่การวัดอิทธิพล การประมาณสถานะ

ทันทานวิธีที่ 1 ถึงวิธีที่ 3 จะให้ความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำกว่าการประมาณสถานะทันทานวิธีที่ 4 ถึงวิธีที่ 6 แต่ในกรณีมีข้อมูลไม่ดีที่การวัดอิทธิพล การประมาณสถานะทันทานวิธีที่ 5 จะให้ความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำสุด และการประมาณสถานะทันทานวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 จะให้ความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำกว่าการประมาณสถานะทันทานวิธีที่ 1

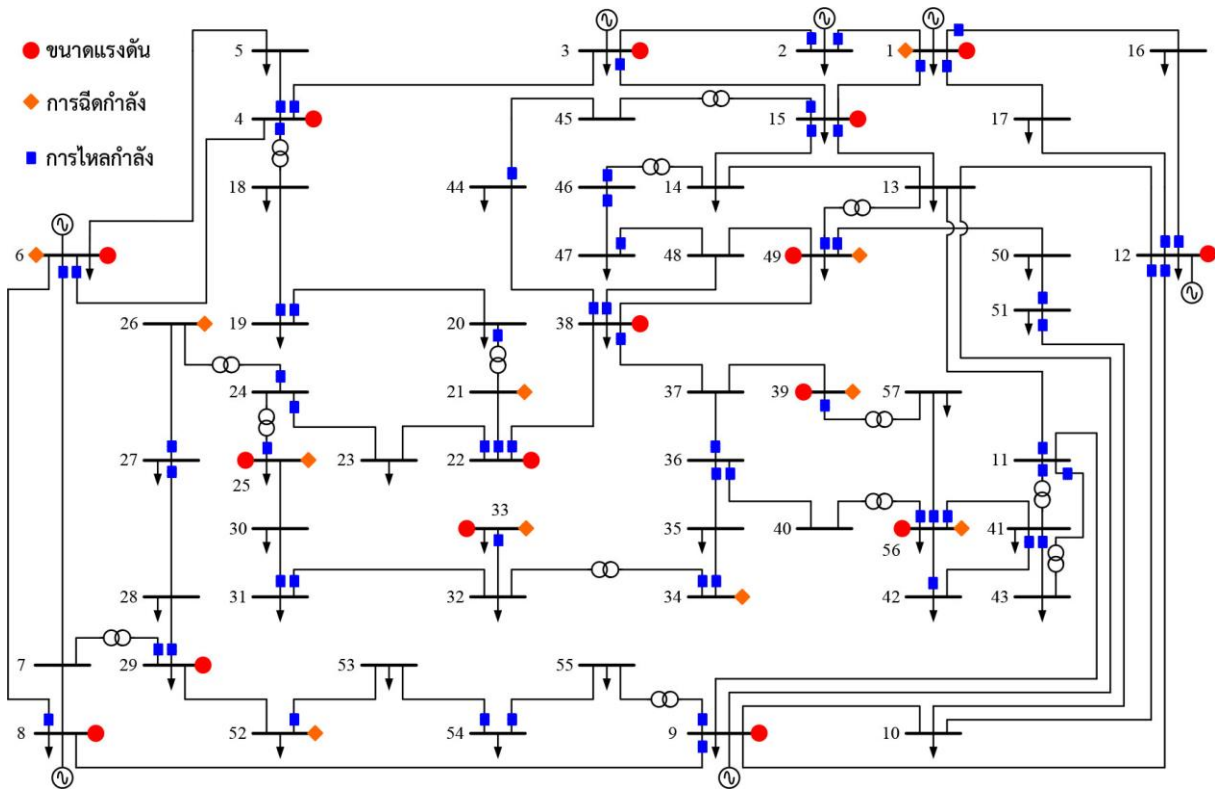
4.2 ระบบ IEEE 57 บัส

ในหัวข้อนี้เป็นการดำเนินการทดสอบการประมาณสถานะโดยใช้ระบบ IEEE 57 บัส ในรูปที่ 2 แสดงระบบทดสอบที่มีการติดตั้งการวัด การทดสอบจะกระทำใน 3 กรณี ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ IEEE ขนาด 14 บัส

วิธีที่	การวนซ้ำ (รอบ)	เวลาคำนวณ (วินาที)	ความผิดพลาดเฉลี่ย		ความผิดพลาดสูงสุด	
			แรงดัน	มุมเฟส	แรงดัน	มุมเฟส
กรณีที่ 1 ไม่มีข้อมูลไม่ดี						
1	7.26	0.38	3.99×10^{-4}	1.46×10^{-2}	6.79×10^{-3}	2.64×10^{-1}
2	4.00	0.23	4.09×10^{-4}	1.58×10^{-2}	6.30×10^{-3}	2.88×10^{-1}
3	4.00	0.22	4.09×10^{-4}	1.58×10^{-2}	6.30×10^{-3}	2.88×10^{-1}
4	4.00	0.22	4.09×10^{-4}	1.58×10^{-2}	6.30×10^{-3}	2.88×10^{-1}
5	4.19	0.29	4.11×10^{-4}	1.57×10^{-2}	6.35×10^{-3}	2.88×10^{-1}
6	4.00	0.23	3.68×10^{-4}	1.55×10^{-2}	6.02×10^{-3}	2.85×10^{-1}
กรณีที่ 2 มีข้อมูลไม่ดีที่การวัดไม่อิทธิพล						
1	15.02	0.72	5.11×10^{-4}	3.54×10^{-2}	12.43×10^{-3}	7.52×10^{-1}
2	5.64	0.30	4.88×10^{-4}	2.94×10^{-2}	11.32×10^{-3}	8.14×10^{-1}
3	5.64	0.30	4.88×10^{-4}	2.93×10^{-2}	11.32×10^{-3}	8.14×10^{-1}
4	5.00	0.28	5.71×10^{-4}	13.44×10^{-2}	16.30×10^{-3}	35.54×10^{-1}
5	22.61	1.14	8.24×10^{-4}	22.58×10^{-2}	13.94×10^{-3}	32.42×10^{-1}
6	4.00	0.23	5.90×10^{-4}	14.61×10^{-2}	13.12×10^{-3}	19.45×10^{-1}
กรณีที่ 3 มีข้อมูลไม่ดีที่การวัดอิทธิพล						
1	13.65	0.66	4.91×10^{-4}	8.97×10^{-2}	6.53×10^{-3}	10.84×10^{-1}
2	5.08	0.27	4.32×10^{-4}	5.10×10^{-2}	6.53×10^{-3}	17.30×10^{-1}
3	5.08	0.28	4.31×10^{-4}	5.09×10^{-2}	6.53×10^{-3}	17.30×10^{-1}
4	4.41	0.25	4.49×10^{-4}	13.58×10^{-2}	6.53×10^{-3}	14.01×10^{-1}
5	6.76	0.40	4.25×10^{-4}	3.32×10^{-2}	6.53×10^{-3}	4.08×10^{-1}
6	4.00	0.23	4.32×10^{-4}	16.16×10^{-2}	6.53×10^{-3}	17.58×10^{-1}

หมายเหตุ: แรงดัน มีหน่วยเป็น ต่อหน่วย และ มุมเฟส มีหน่วยเป็น องศา



รูปที่ 2 ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส พร้อมการวัด

กรณีที่ 1: ไม่มีข้อมูลไม่ดี

กรณีที่ 2: มีข้อมูลไม่ดีเกิดขึ้นที่การวัดการไหลกำลังบนสายส่ง 4-5, 11-43, 29-7, 41-42 และ 44-45 ซึ่งไม่ใช่การวัดอิทธิพล

กรณีที่ 3: มีข้อมูลไม่ดีเกิดขึ้นที่การวัดอิทธิพล คือ การฉีดกำลังที่บัส 33 และบัส 56 การไหลกำลังบนสายส่ง 8-6, 15-14 และ 38-48

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 กรณี ของระบบ IEEE 57 บัส เมื่อมีการใช้การจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation) จำนวน 500 รอบ จากผลลัพธ์ในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า กรณีไม่มีข้อมูลไม่ดีขึ้น การประมาณสถานะหนทางวิธีที่ 1 และวิธีที่ 6 จะให้ความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำกว่าการประมาณสถานะหนทางวิธีอื่น ๆ และการประมาณสถานะหนทางวิธีที่ 1 และวิธีที่ 5 ต้องการรอบการวนซ้ำมากกว่าและใช้เวลาคำนวณนานกว่าการประมาณสถานะหนทางวิธีอื่น ทั้งนี้หากมีข้อมูลไม่ดีเกิดขึ้น การประมาณสถานะหนทางวิธีที่ 1

วิธีที่ 2 วิธีที่ 3 และวิธีที่ 5 จะต้องการรอบการวนซ้ำเพิ่มขึ้น ในกรณีมีข้อมูลไม่ดีที่ไม่ใช่การวัดอิทธิพลนั้น การประมาณสถานะหนทางวิธีที่ 2 ถึงวิธีที่ 4 จะให้ความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำกว่าการประมาณสถานะหนทางวิธีที่ 5 และวิธีที่ 6 อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดข้อมูลไม่ดีขึ้น การประมาณสถานะหนทางวิธีที่ 1 สามารถให้ความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำกว่าการประมาณสถานะหนทางวิธีอื่น

4.3 ผลกระทบจากการเลือกค่า c ในฟังก์ชันจุดประสงค์

ค่า c ในฟังก์ชันจุดประสงค์ของการประมาณสถานะหนทางจะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของการประมาณสถานะในบทความ [8] ได้แนะนำค่า c ที่ควรจะเป็นสำหรับการประมาณสถานะหนทางแบบวิธีกำลังสองคงที่ แบบวิธีกำลังสองเชิงเส้น และแบบวิธีกำลังสองค่า c ในรอบการวนซ้ำแรก ๆ ควรเลือกให้มีค่าสูงแต่ในรอบการวนซ้ำถัดไปควรเลือกให้มีค่าต่ำ [9] อย่างไรก็ตาม การเลือกค่า c ของการประมาณสถานะหนทางวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุดยังไม่มีแนวทางที่ชัดเจน แต่ค่า c จะต้องไม่เป็นศูนย์ [11]

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ IEEE 57 บัส

วิธีที่	การวนซ้ำ (รอบ)	เวลาคำนวณ (วินาที)	ความผิดพลาดเฉลี่ย		ความผิดพลาดสูงสุด	
			แรงดัน	มุมเฟส	แรงดัน	มุมเฟส
กรณีที่ 1 ไม่มีข้อมูลไม่ตี						
1	8.14	1.95	1.21×10^{-4}	0.63×10^{-2}	4.34×10^{-3}	3.50×10^{-1}
2	3.00	0.77	1.66×10^{-4}	0.66×10^{-2}	9.80×10^{-3}	3.03×10^{-1}
3	3.00	0.78	1.66×10^{-4}	0.66×10^{-2}	9.80×10^{-3}	3.03×10^{-1}
4	3.00	0.77	1.66×10^{-4}	0.66×10^{-2}	9.80×10^{-3}	3.03×10^{-1}
5	7.91	2.12	1.74×10^{-4}	0.72×10^{-2}	11.33×10^{-3}	6.20×10^{-1}
6	4.00	1.02	1.18×10^{-4}	0.69×10^{-2}	5.59×10^{-3}	3.17×10^{-1}
กรณีที่ 2 มีข้อมูลไม่ตีที่การวัดอิทธิพล						
1	20.90	4.69	2.08×10^{-4}	1.97×10^{-2}	12.11×10^{-3}	8.17×10^{-1}
2	3.70	0.92	2.10×10^{-4}	2.66×10^{-2}	9.90×10^{-3}	9.42×10^{-1}
3	3.70	0.93	2.11×10^{-4}	2.66×10^{-2}	9.90×10^{-3}	9.42×10^{-1}
4	3.00	0.78	2.31×10^{-4}	3.02×10^{-2}	9.90×10^{-3}	9.42×10^{-1}
5	15.64	3.86	2.64×10^{-4}	3.45×10^{-2}	11.30×10^{-3}	9.70×10^{-1}
6	4.00	1.02	3.33×10^{-4}	3.29×10^{-2}	11.75×10^{-3}	10.05×10^{-1}
กรณีที่ 3 มีข้อมูลไม่ตีที่การวัดอิทธิพล						
1	21.26	4.78	2.00×10^{-4}	1.73×10^{-2}	9.75×10^{-3}	10.44×10^{-1}
2	4.19	1.02	2.48×10^{-4}	4.00×10^{-2}	9.71×10^{-3}	13.91×10^{-1}
3	4.19	1.03	2.49×10^{-4}	4.00×10^{-2}	9.71×10^{-3}	13.91×10^{-1}
4	3.01	0.78	2.45×10^{-4}	4.64×10^{-2}	9.71×10^{-3}	13.03×10^{-1}
5	16.61	4.08	2.84×10^{-4}	3.57×10^{-2}	12.05×10^{-3}	17.91×10^{-1}
6	4.00	1.01	2.89×10^{-4}	4.45×10^{-2}	10.28×10^{-3}	13.14×10^{-1}

หมายเหตุ: แรงดัน มีหน่วยเป็น ต่อหน่วย และ มุมเฟส มีหน่วยเป็น องศา

ในหัวข้อนี้เราจะศึกษาผลกระทบของค่า c ในฟังก์ชันจุดประสงค์ของการประมาณสถานะหนทาง ได้แก่ วิธีกำลังสองคงที่ วิธีกำลังสองเชิงเส้น วิธีรากลำลังสอง วิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์ และวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด ในที่นี้ค่า c ที่เลือกจะเป็นค่าในรอบการวนซ้ำรอบถัดไปของการประมาณสถานะหนทางวิธีกำลังสองคงที่ วิธีกำลังสองเชิงเส้น และวิธีรากลำลังสอง แต่การประมาณสถานะหนทางวิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์ และวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุดจะใช้ค่า c ที่เลือกในการวนซ้ำทุกรอบ การทดสอบจะประมาณสถานะของระบบ IEEE 57 บัส ที่มีการติดตั้งการวัดดังในรูปที่ 2 และทดสอบในกรณีมีข้อมูลไม่ตีเกิดขึ้นที่การวัดอิทธิพล โดยใช้การจำลองมอนติคาร์โล จำนวน 100 รอบ

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละของการลู่ออกเข้าหาผลเฉลยและความผิดพลาดเฉลี่ยของแรงดัน ซึ่งเราก็จะเห็นได้ว่าการเลือกค่า c ต่ำเกินไปก็อาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการลู่ออกเข้าหาผลเฉลยของการประมาณสถานะหนทางได้ แต่หากเลือกค่าสูงเกินไปก็จะทำให้ค่าสถานะที่ประมาณได้มีความแม่นยำลง อย่างไรก็ตาม การเลือกค่า c ของการประมาณสถานะวิธีที่ 6 ควรเลือกค่าไม่ต่ำกว่า 10

5. สรุปผล

บทความนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการประมาณสถานะหนทางแบบวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด วิธีกำลังสองคงที่ วิธีกำลังสองเชิงเส้น วิธีรากลำลังสอง วิธีเอ็มทั่วไป ซเวปปี-ฮูเบอร์ และแบบวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด โดยใช้

ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส และ 57 บัส ผลลัพธ์จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ในกรณีไม่มีข้อมูลไม่ดีทุกวิธีการประมาณสถานะหนทางจะให้ความแม่นยำในการประมาณสถานะใกล้เคียงกัน โดยการประมาณสถานะวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดจะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำสุด แต่จะใช้เวลาคำนวณนานที่สุด อย่างไรก็ตาม หากมีข้อมูลไม่ดีแต่ละวิธีการประมาณสถานะหนทางจะมีสมรรถนะการประมาณสถานะแตกต่างกัน โดยกรณีมีข้อมูลไม่ดีในการวัดไม่อิทธิพลการประมาณสถานะหนทางวิธีรากกำลังสอง, วิธีเอ็มทั่วไป, วิธีชเวปี-ฮูเบอร์ และวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด จะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงกว่าการประมาณสถานะหนทางวิธีอื่น ขณะที่การประมาณสถานะวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด, วิธีกำลังสองคงที่ และวิธีกำลังสองเชิงเส้น จะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยการประมาณสถานะวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดจะใช้เวลาคำนวณนานที่สุด

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนค่า c

วิธีที่	ค่า c			
	3	5	10	15
ร้อยละของการรู้เข้าหาผลเฉลย				
2	62	100	100	100
3	58	100	100	100
4	85	100	100	100
5	97	100	100	100
6	0	0	100	100
ความผิดพลาดเฉลี่ยของแรงดัน ($\times 10^{-4}$) ในหน่วย ต่อหน่วย				
2	2.45	2.49	2.43	2.51
3	2.45	2.49	2.43	2.51
4	2.61	2.51	2.43	2.51
5	2.85	2.82	2.65	2.73
6	-	-	2.59	2.59

สำหรับกรณีมีข้อมูลไม่ดีในการวัดอิทธิพลของระบบ IEEE 14 บัส พบว่า การประมาณสถานะหนทางวิธีเอ็มทั่วไป, วิธีชเวปี-ฮูเบอร์ จะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำสุด การประมาณสถานะวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดจะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงกว่าวิธีการอื่น ส่วนกรณีมีข้อมูลไม่ดีในการวัดอิทธิพลของระบบ IEEE 57 บัส พบว่า การประมาณสถานะวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดจะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำสุด แต่การประมาณสถานะหนทางวิธีเอ็มทั่วไป, วิธีชเวปี-ฮูเบอร์ และวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด จะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงกว่าการประมาณสถานะหนทางวิธีอื่น

ค่า c ในฟังก์ชันจุดประสงค์ของการประมาณสถานะหนทางวิธีกำลังสองคงที่, วิธีกำลังสองเชิงเส้น, วิธีรากกำลังสอง, วิธีเอ็มทั่วไป, วิธีชเวปี-ฮูเบอร์ และวิธีกำลังสองเลขชี้กำลังสูงสุด จะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะในการประมาณสถานะ หากค่า c มีค่าต่ำเกินไป ก็อาจส่งผลให้การประมาณสถานะไม่ลู่เข้าหาผลเฉลย ในทางตรงข้าม หากค่า c มีค่าสูงเกินไป ก็อาจส่งผลให้สถานะที่ประมาณได้มีความผิดพลาดได้สูง ดังนั้น การประมาณสถานะหนทางวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุดจึงเป็นวิธีการที่ไม่ต้องใช้ค่า c ในฟังก์ชันจุดประสงค์ จึงมีความง่ายในการประยุกต์ใช้งานในระบบจริงมากกว่าการประมาณสถานะวิธีการอื่น และยังสามารถให้ความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตาม การประมาณสถานะหนทางวิธีค่าสัมบูรณ์น้อยสุด จะใช้เวลาคำนวณค่อนข้างนานกว่าการประมาณสถานะวิธีอื่น ๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) คณะผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Monticelli, State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach, New York: Springer, 1999.

- [2] L. Mili and T. Van Cutsem, "Implementation of the hypothesis testing identification in power system state estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 3, Aug., pp. 887-893, 1988.
- [3] A. Abur and A. Gómez-Expósito, *Power System State Estimation: Theory and Implementation*, New York: Marcel Dekker, 2004.
- [4] M. R. Irving, R. C. Owen and M. J. H. Sterling, "Power system state estimation using linear programming," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 125, no. 9, Sep., pp. 879-885, 1978.
- [5] R. A. Jabr and B. C. Pal, "Iteratively re-weighted least absolute value method for state estimation," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 4, Jul., pp. 385-391, 2003.
- [6] C. Rakpenthai, S. Uatrongjit, I. Ngamroo and N. R. Watson, "Weighted least absolute value power system state estimation using rectangular coordinates and equivalent measurement functions," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 6, no. 6, Nov., pp. 534-539, 2011.
- [7] M. Göl and A. Abur, "LAV based robust state estimation for systems measured by PMUs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, Jul., pp. 1808-1814, 2014.
- [8] E. Handschin, F. C. Schweppe, J. Kohlas and A. Fiechter, "Bad data analysis for power system state estimation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 2, Mar., pp. 329-337, 1975.
- [9] R. Baldick, K. A. Clements, Z. Pinjo-Dzagal and P. W. Davis, "Implementing nonquadratic objective functions for state estimation and bad data rejection," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, Feb., pp. 376-382, 1997.
- [10] L. Mili, M. G. Cheniae, N. S. Vichare and P. J. Rousseeuw, "Robust state estimation based on projection statistics," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, May., pp. 1118-1127, 1996.
- [11] W. Wu, Y. Guo, B. Zhang, A. Bose and S. Hongbin, "Robust state estimation method based on maximum exponential square," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 11, Nov., pp. 1165-1172, 2011.
- [12] เขวศักดิ์ รักเป็นไทย และ เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์, "การเปรียบเทียบวิธีการประมาณสถานะทันทานสำหรับการประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง," ในการประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 40, โรงแรม เดอะชาयน์, จังหวัดชลบุรี, 2560.
- [13] Y. Chen and N. Zhou, "A comparative study on state estimation algorithms for power systems," *The 52nd North American Power Symposium (NAPS)*, 2021, pp. 1-6.
- [14] C. Rakpenthai and S. Uatrongjit, "A robust WLAV state estimation based on pseudo-voltage measurements," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 6, Jun., pp. 854-862, 2020.

- [15] T. Chen, H. Ren, E. Y. S. Foo, L. Sun and G. A. J. Amaratunga, "A fast and robust state estimator based on exponential function for power systems," IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 6, Mar., pp. 5755-5767, 2022.
- [16] R. Christie, "Power systems test case archive-UWEE," [Online]. Available: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/>. [Accessed May. 19 2022].