

## การตรวจสอบและแสดงค่าวัดที่ผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีการประมาณสถานะ

## Detection and Identification of Bad Measurements in Power System

## Employing a State Estimation Technique

บัญชา วัฒนนะ<sup>1</sup> สัมฤทธิ์ หังสะสุตร<sup>1</sup> สุรัชย์ ลิ้มยิ่งเจริญ<sup>1</sup> และ จิตติพัฒน์ ตรียางกูรศรี<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ต. ในเมือง อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40002 โทร.(043) 246589

Email : buncha\_w@hotmail.com

<sup>2</sup>ศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ต. ในเมือง อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40000 โทร. (043) 222246

Email : r2jtp@egat.or.th

## บทคัดย่อ

ในระบบไฟฟ้ากำลังศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าได้รับข้อมูลขนาดของแรงดัน ปริมาณกำลังการผลิต กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและโหนดจากอุปกรณ์วัดที่ติดตั้งอยู่ตามโรงไฟฟ้า และสถานีไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ผ่านทางระบบสื่อสาร ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าข้อมูลเหล่านี้บางส่วนอาจไม่ถูกต้องเนื่องจากความผิดพลาดของอุปกรณ์วัดหรือเกิดการรบกวนในระบบสื่อสาร ทำให้ข้อมูลที่ได้ขาดความน่าเชื่อถือ และยังคงส่งผลกระทบต่อการทำงาน ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบและแก้ไขข้อมูลให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยหลักการประมาณสถานะ (state estimation) จะอาศัยค่าที่วัดได้มาคำนวณค่าตัวแปรสถานะ (state variables) คือ ขนาดของแรงดัน และ มุมเฟส ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดถ่วงน้ำหนัก ทำให้ได้ค่าประมาณที่มีความผิดพลาดน้อยลง และมีการตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยทฤษฎีทางสถิติ ผลการทดสอบกับข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขต 2) สามารถแสดงค่าวัดที่ผิดพลาด และให้ค่าประมาณที่มีความถูกต้องมากกว่าค่าวัดที่ได้

## Abstract

Recent power systems are becoming more complex and the task for operating such systems in a stable condition is much more difficult. The energy control center continuously monitors system data such as voltage magnitudes, generating power, real and reactive power flows from various remote instruments in the system. Communication system is the most vital means for transferring data between the control center and the remote substations. It is likely that the data will contain measurement's errors or noises arising in the communication channel. The measurements with large errors are detected by the state-estimation

based on weighted least square method employing voltage magnitudes and relative phase angles as state, and corrected by the states obtained. The statistical theory are then used to identify bad measurements. The procedure has been applied to practical data sets of EGAT System Region 2 some bad measurement has been detected.

**Keywords :** weighted least square, state estimation, hypothesis test

## 1. บทนำ

ปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าจะต้องทราบสถานะการทำงานของระบบอยู่ตลอดเวลา เพื่อควบคุมและรักษาการทำงานของระบบให้อยู่ในภาวะปกติ โดยข้อมูลที่ศูนย์ควบคุมฯ ได้รับ เช่น ขนาดแรงดัน (voltage magnitudes) ปริมาณกำลังการผลิต (generating power) กำลังที่ไหลในสายส่ง (power flow) และ โหลด (demand) จากอุปกรณ์วัดที่ติดตั้งอยู่ตามโรงไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าแรงสูงต่างๆผ่านทางระบบสื่อสาร โดยทั่วไปแล้วค่าวัดเหล่านี้บางส่วนอาจมีความผิดพลาดได้ ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความบกพร่องของอุปกรณ์วัดหรือเกิดการรบกวน (noise) ในระบบสื่อสาร [1-2] และค่าวัดที่ผิดพลาดนี้อาจมีผลต่อการควบคุมและความน่าเชื่อถือของระบบ นอกจากรายการข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ในด้านอื่นๆ เช่น การจัดสรรกำลังการผลิต (economic dispatch) ดังนั้น จึงต้องมีการตรวจสอบและแก้ไขข้อมูลให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอหลักการประมาณสถานะมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว

## 2. หลักการและทฤษฎี

## 2.1. การหาค่าประมาณสถานะด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least Squares State Estimation) [3]

RECEIVED 9 MAY, 2002

ACCEPTED 24 JANUARY, 2003

การหาค่าประมาณสถานะเป็นการนำข้อมูลหรือค่าวัดที่ได้มาหาค่าประมาณที่ดีที่สุดของตัวแปรสถานะ (state variables) หรือทำให้ได้ค่าที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดนั่นเอง ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดถ่วงน้ำหนัก (weighted least squares) ดังสมการที่ (1) [4]

$$\min J(x^{est}) = \sum_{i=1}^{Nm} \frac{\{z_i^{meas} - f_i(x^{est})\}^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

เมื่อ

$J(x^{est})$  : ผลรวมของค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง

$x^{est}$  : ตัวแปรสถานะ (state variables)

$z_i^{meas}$  : ค่าวัดที่ได้จากอุปกรณ์วัด

$f_i$  : ค่าฟังก์ชันของตัวแปรสถานะ

$\sigma_i^2$  : ค่าความแปรปรวน (variance) ของอุปกรณ์วัด

$N_m$  : จำนวนค่าวัด

สำหรับตัวอย่างบางเทอมในสมการที่ (1) เช่น ถ้าค่าวัดเป็นกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส  $i$  ไปบัส  $j$  จะมีเทอมเป็น

$$\frac{\{P_y^{meas} - (-V_i^2 G_{ij} + V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j))\}^2}{\sigma_{P_{ij}}^2}$$

หรือถ้าค่าวัดเป็นค่าแรงดันของบัส  $i$  จะมีเทอมเป็น

$$\frac{\{V_i^{meas} - V_i\}^2}{\sigma_{V_i}^2}$$

ซึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังขนาด  $N$  บัส ตัวแปรสถานะคือขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟส ของทุกบัส ดังสมการที่ (2)

$$x^{est} = [\delta_1 \delta_2 \dots \delta_N V_1 V_2 \dots V_N]^T \quad (2)$$

โดยปกติแล้วจำนวนค่าวัดจะมีมากกว่าตัวแปรสถานะอยู่มาก และเมื่อให้  $\delta_i$  เป็นมุมอ้างอิง ( $\delta_i = 0$ ) ดังนั้นจำนวนตัวแปรสถานะ ( $N$ ) จะเท่ากับ  $2N - 1$  จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (3)

$$\min J(x^{est}) = [z^{meas} - f(x^{est})]^T R^{-1} [z^{meas} - f(x^{est})] \quad (3)$$

เมื่อ กำหนดให้

$$z^{meas} = [z_1^{meas} z_2^{meas} \dots z_{N_m}^{meas}]^T \quad (4)$$

เมตริกซ์ของฟังก์ชันตัวแปรสถานะ

$$f(x^{est}) = [f_1(x^{est}) f_2(x^{est}) \dots f_{N_m}(x^{est})]^T \quad (5)$$

และเมตริกซ์ variance ของอุปกรณ์วัด

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{N_m}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

หาค่า  $\min J(x^{est})$  โดยหาค่าเกรเดียนท์และให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\nabla_x J(x^{est}) = -2H^T R^{-1} e = 0 \quad (7)$$

เมื่อ  $H$  คือ จาคอบีเนียนเมตริกซ์

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_{N_m}(x)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{N_m}(x)}{\partial x_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_{N_t}} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_{N_t}} & \dots & \frac{\partial f_{N_m}(x)}{\partial x_{N_t}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

และ  $e$  คือผลต่างของค่าที่วัดได้กับค่าประมาณ

$$e = \begin{bmatrix} z_1 - f_1(x) \\ z_2 - f_2(x) \\ \vdots \\ z_{N_m} - f_{N_m}(x) \end{bmatrix} \quad (9)$$

เนื่องจาก  $f(x)$  เป็นสมการซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น การหาคำตอบจะใช้การทวนซ้ำด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) ดังนี้ จากวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\Delta x = \left( \frac{\partial \nabla J(x)}{\partial x} \right)^{-1} (-\nabla J(x)) \quad (10)$$

แต่

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nabla J(x)}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (-2H^T R^{-1} e) \\ &= -2H^T R^{-1} (-H) \\ &= 2H^T R^{-1} H \end{aligned} \quad (11)$$

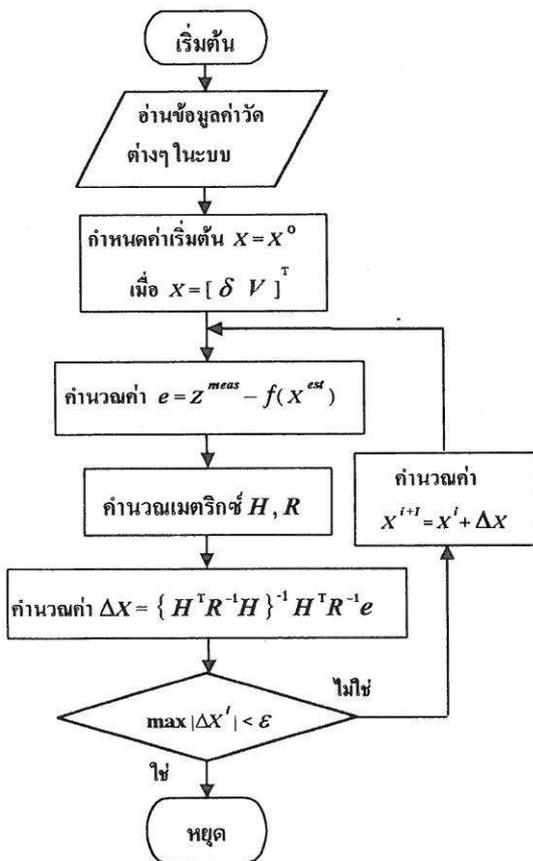
ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{1}{2} (H^T R^{-1} H)^{-1} (2H^T R^{-1} e) \\ &= (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} e \end{aligned} \quad (12)$$

และทำการปรับปรุงค่าตัวแปรสถานะแล้ววนซ้ำเพื่อให้ผู้เข้าผู้ค่าคำตอบ

$$X^{i+1} = X^i + \Delta X \quad (13)$$

โดยกำหนดค่าเริ่มต้น  $X^0$  ซึ่งก็คือ ขนาดแรงดันและมุมเฟสของทุกบัสให้มีค่าเป็น  $1 \angle 0^\circ pu$  แล้วทำการรวบรวมการวนซ้ำจนได้ค่าที่มากที่สุดของ  $\Delta X^i$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $\epsilon$  ที่กำหนด และค่า  $X$  สุดท้ายที่ได้ก็คือ ค่าประมาณของตัวแปรสถานะ (estimated state variables) ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าอื่นๆ เช่น ขนาดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง โดยขั้นตอนการหาค่าประมาณสถานะ ดังแสดงในรูปที่ 1

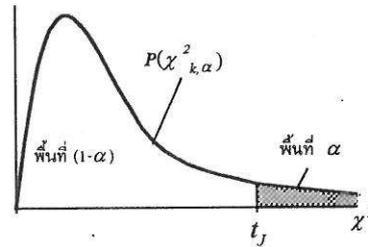


รูปที่ 1 ขั้นตอนการหาค่าประมาณสถานะ

## 2.2 การตรวจสอบและแสดงค่าวัดที่ผิดพลาด

ในการตรวจสอบหาค่าวัดที่ผิดพลาดนั้น จะอาศัยทฤษฎีการทดสอบทางสถิติ (hypothesis test) เนื่องจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจาก

อุปกรณ์วัดนั้น เป็นค่าผิดพลาดสุ่ม (random error) ซึ่งมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal distribution) และค่าของ  $J(X^{est})$  ที่ได้จะเป็นค่าสุ่มที่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ ไค-สแควร์ (Chi-squared distribution)  $\chi^2_{k,\alpha}$  โดยที่  $k$  คือ ชั้นแห่งความอิสระ (degree of freedom) มีค่าเท่ากับ  $N_m - N_r$  และ  $\alpha$  คือระดับความมีนัยสำคัญ (significant level) ที่มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้ง ดังในรูปที่ 2

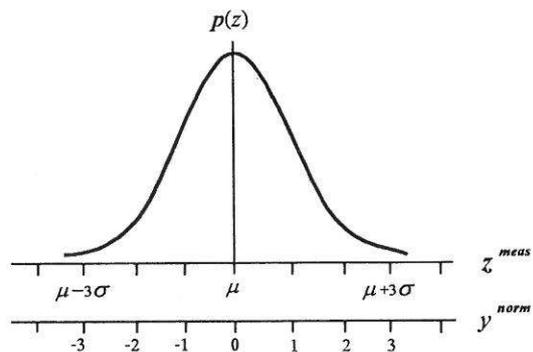


รูปที่ 2 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไค-สแควร์

โดยมีค่าเฉลี่ย (mean,  $\mu$ ) เท่ากับ  $k$  และ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation,  $\sigma_{j(w)}$ ) เท่ากับ  $\sqrt{2k}$  มีสมการความน่าจะเป็นดังสมการที่ (14)

$$P(J(X^{est}) \cdot \chi^2_{k,\alpha}) = 1 - \alpha \quad (14)$$

ตัวอย่างการทดสอบ เช่น สมมติว่าเลือกระดับความมีนัยสำคัญ  $\alpha = 0.01$  ซึ่งมีชั้นแห่งความอิสระ  $k$  ( $N_m - N_r$ ) โดยมีค่า  $\chi^2_{k,\alpha} = t_j$  (สามารถหาค่าได้จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไค-สแควร์) นั่นคือความน่าจะเป็นที่  $J(X^{est}) < t_j$  เท่ากับ 0.99 (1-0.01) หรือความน่าจะเป็นที่ไม่มีค่าวัดที่ผิดพลาดเท่ากับ 99% โดยจะเห็นว่าถ้ามีค่าวัดที่ผิดพลาดมากกว่าค่ายกกำลังสองของเทอมอื่นๆ ก็จะมีค่ามากขึ้นและทำให้  $J(X^{est})$  มีค่ามากกว่า  $t_j$  ซึ่งการตรวจสอบหาค่าวัดที่ผิดพลาดนั้นจะอาศัยคุณสมบัติของการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ ดังรูปที่ 3



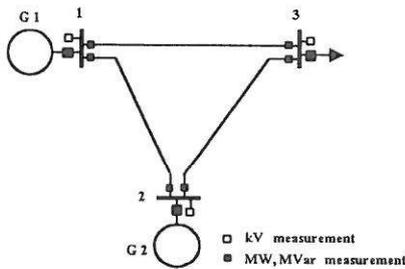
รูปที่ 3 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ

จากรูปที่ 3 เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าวัดซึ่งมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ จะเห็นว่าความน่าจะเป็นที่ค่าวัดที่ได้จะอยู่ภายในช่วง  $\mu \pm 3\sigma$  มากกว่า 0.99 (หรือ 99%) และ ถ้ากำหนดให้

$$y_i^{norm} = \frac{z_i^{meas} - f_i(x^{est})}{\sigma_{y_i}} \quad (15)$$

เมื่อ  $\sigma_{y_i}$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) จะได้ว่า  $y_i^{norm}$  มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติมาตรฐาน (standard normal distribution) ซึ่งมีค่า  $\mu = 0$  และ  $\sigma = 1$  เรียกว่า *normalized measurement residual* โดยถ้า  $y_i^{norm} < -3$  หรือ  $y_i^{norm} > 3$  (หรือเขียนได้เป็น  $|y_i^{norm}| > 3$ ) นั่นคือ ความน่าจะเป็นที่ค่าวัดนั้นจะมีความผิดพลาดมากกว่า 99%

3. ตัวอย่างและผลการคำนวณ



รูปที่ 4 ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

จากรูปที่ 4 เป็นตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส [5] ที่ทราบค่าคำตอบ คือ ขนาดแรงดันและกำลังไฟฟ้าของแต่ละบัสรวมทั้งกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และเพื่อผลการหาค่าประมาณสถานะสามารถทำได้โดยการรวมค่าความผิดพลาดสุ่ม (random error) เข้ากับค่าคำตอบ แล้วให้เสมือนเป็นค่าวัดที่ได้จากอุปกรณ์วัด แล้วส่งข้อมูลมายังศูนย์ควบคุมฯ ซึ่งได้ผลการหาค่าประมาณสถานะโดยเปรียบเทียบค่าตอบและค่าวัด ดังในตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่าประมาณส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าตอบมากกว่าค่าวัดหรือมีความถูกต้องมากกว่าค่าวัดที่ได้ ซึ่งโดยหลักของการประมาณสถานะก็คือ การกรองค่าความผิดพลาดสุ่มที่มีอยู่ในค่าวัดทิ้งไปหรือทำให้มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดนั่นเอง และจากตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่า  $J(x)$  ในรอบสุดท้ายมีค่ามากกว่า  $t_j$  ( $= 32.0$  : ตารางแจกแจงความน่าจะเป็นแบบโค-สแควร์ ที่  $k=16$  และ  $\alpha = 0.01$ ) แสดงว่ามีค่าวัดที่ผิดพลาด สามารถตรวจสอบได้โดยจะเห็นว่าค่าวัด  $V_2, P_{G1}, P_{12}$  และ  $Q_{23}$  มี  $|y_i^{norm}| > 3$  แสดงว่ามีความน่าจะเป็นสูงที่จะเป็นค่าวัดที่ผิดพลาดซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าค่าวัดดังกล่าว มีความผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนสูงกว่าค่าวัดอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าตอบ (ดูในตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ผลการหาค่าประมาณสถานะเปรียบเทียบกับ ค่าตอบ และค่าวัด (มีหน่วยเป็น kV, MW, MVar ตามชนิดของปริมาณทางไฟฟ้า)

Meas.	ค่าตอบ	ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y_i^{norm}$
$V_1$	120.8	119.0	118.1	0.89
$V_2$	119.6	113.4	116.9	-3.56
$V_3$	111.7	108.9	108.9	0.04
$P_{G1}$	218.4	225.4	221.9	4.50
$Q_{G1}$	140.9	141.0	142.7	-2.21
$P_{G2}$	200.0	198.7	200.0	-1.64
$Q_{G2}$	146.2	145.2	144.1	1.41
$P_L$	400.0	402.9	402.4	-0.64
$Q_L$	250.0	249.5	247.6	-2.45
$P_{12}$	39.1	35.1	40.5	-5.87
$Q_{12}$	22.1	23.4	23.4	-0.05
$P_{13}$	179.4	180.6	181.4	-0.89
$Q_{13}$	118.7	119.9	119.2	0.71
$P_{21}$	-38.9	-39.2	-40.3	1.19
$Q_{21}$	-21.6	-23.7	22.8	-0.95
$P_{23}$	238.9	239.7	240.8	-0.61
$Q_{23}$	167.7	162.3	167.0	-5.18
$P_{31}$	-171.0	-172.6	-172.5	-0.10
$Q_{31}$	-101.9	-102.8	-101.4	-1.51
$P_{32}$	-229.0	-229.8	-229.9	0.10
$Q_{32}$	-148.1	-146.9	-146.2	-0.72

ตารางที่ 2 แสดงค่า  $J(x)$  ของแต่ละรอบ

รอบที่	ค่า $J(x)$
1	929.46
2	87.97
3	87.90

แต่ในความเป็นจริงปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้จากระบบจริงไม่ว่าจะเป็นขนาดแรงดัน กำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ล้วนแล้วแต่เป็นค่าวัดที่ได้จากอุปกรณ์วัดทั้งสิ้น และเราจะไม่รู้ค่าสถานะ (state) ที่แท้จริงของระบบดังนั้นเมื่อทดสอบกับระบบจริงจึงมีเฉพาะค่าวัดกับค่าประมาณเท่านั้น (ไม่มีค่าคำตอบ) แต่จะอยู่บนสมมติฐานหรือทฤษฎีทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับค่าวัดและค่าความผิดพลาดสุ่มที่เกิดจากอุปกรณ์วัด

4. ผลการทดสอบ

โดยใช้ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขต 2) ดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นข้อมูลทางศูนย์ควบคุมฯ (ขอนแก่น) ได้รับจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ในเขตภาคอีสาน จำนวน 53 บัส และใช้ ค่าวัดซึ่งได้แก่ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง มีจำนวน 269 ค่าวัด โดยทำการทดสอบกับข้อมูลหลายๆเวลา



ตารางที่ 4 ค่าประมาณกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่งเปรียบเทียบกับค่าวัดที่ได้

No.	สายส่ง		สายที่ / จำนวนสาย	$P_g$ (MW)			$Q_g$ (MVar)			$P_\mu$ (MW)			$Q_\mu$ (MVar)		
	บัส $i$	บัส $j$		ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y_i^{norm}$	ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y_i^{norm}$	ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y_i^{norm}$	ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y_i^{norm}$
1	AN	MD	1/1	-25.9	-26.0	0.04	15.1	16.2	-0.61	ไม่มี	28.5	-	ไม่มี	-19.8	-
2	AN	UB1	1/1	10.6	11.8	-0.50	-3.6	-6.4	1.56	-9.6	-11.8	0.92	2.9	0.9	0.83
3	AN	YT	1/2	ไม่มี	-0.9	-	ไม่มี	-7.6	-	0.0	0.9	-0.38	4.0	3.7	0.15
4	AN	YT	2/2	ไม่มี	-0.9	-	ไม่มี	-7.6	-	0.0	0.9	-0.38	4.8	3.7	0.46
5	PMN	UB2	1/2	ไม่มี	0.0	-	ไม่มี	-2.0	-	0.0	0.0	0.00	-3.0	-3.0	0.00
6	PMN	UB2	2/2	ไม่มี	0.0	-	ไม่มี	-2.0	-	0.0	0.0	0.00	-3.0	-3.0	0.00
7	POT	RE	1/1	ไม่มี	-8.6	-	ไม่มี	0.6	-	9.6	8.7	0.19	0.0	-4.4	0.92
8	PYK	RE	1/2	ไม่มี	-30.0	-	ไม่มี	-3.7	-	30.7	30.4	0.06	0.0	-1.0	0.28
9	PYK	RE	2/2	ไม่มี	-30.0	-	ไม่มี	-3.7	-	30.7	30.4	0.06	0.0	-1.0	0.28
10	PYK	SU	1/1	ไม่มี	45.8	-	ไม่มี	-3.6	-	-44.8	-44.8	0.00	1.3	1.3	0.00
11	RE	YT	1/3	12.8	13.6	-0.40	-0.6	-1.4	0.50	-15.4	-13.4	-0.83	-1.0	-4.1	1.29
12	RE	YT	2/3	12.8	13.6	-0.40	-1.3	-1.4	0.06	-15.4	-13.4	-0.83	-1.0	-4.1	1.29
13	RE	YT	3/3	9.0	9.3	-0.19	-2.4	-4.8	2.00	-11.2	-9.2	-0.83	1.6	-0.4	0.83
14	SKA	SU	1/1	ไม่มี	-4.8	-	ไม่มี	-2.8	-	5.1	4.8	0.09	0.0	-1.2	0.38
15	SRD	UB1	1/2	ไม่มี	18.5	-	ไม่มี	-14.0	-	-17.3	-17.7	0.33	9.6	9.9	-0.25
16	SRD	UB1	2/2	ไม่มี	18.5	-	ไม่มี	-14.0	-	-18.2	-17.7	-0.42	10.1	9.9	0.17
17	SRD	BYO	1/1	-42.5	-42.5	0.00	4.2	4.2	0.00	ไม่มี	42.7	-	ไม่มี	-4.6	-
18	SS	UB2	1/2	ไม่มี	0.9	-	ไม่มี	-4.9	-	-2.4	-0.9	-0.75	0.6	-0.5	0.73
19	SS	UB2	2/2	ไม่มี	0.9	-	ไม่มี	-4.9	-	-1.6	-0.9	-0.35	0.6	-0.5	0.73
20	SS	YT	1/2	-13.4	-11.4	-0.83	1.9	-1.5	1.42	13.4	11.5	0.79	-4.8	-5.3	0.21
21	SS	YT	2/2	-13.4	-11.4	-0.42	2.9	-1.5	1.83	13.4	11.5	0.40	-4.3	-5.3	0.28
22	UB1	UB2	1/2	13.4	14.7	-0.54	-13.4	-12.7	-0.29	-15.2	-14.6	-0.30	10.2	10.9	-0.47
23	UB1	UB2	2/2	14.4	14.7	-0.15	-12.2	-12.7	0.31	-14.4	-14.6	0.10	10.8	10.9	-0.07
24	UB1	YT	1/1	ไม่มี	-8.4	-	ไม่มี	-3.1	-	0.0	8.5	-3.54	0.0	-4.2	1.75
25	RE	KL	1/2	-18.4	-21.2	1.40	10.2	9.8	0.25	22.1	21.4	0.29	-12.5	-12.5	0.00
26	RE	KL	2/2	-22.4	-21.2	-0.60	10.2	9.8	0.25	22.1	21.4	0.29	-11.5	-12.5	0.42
27	RE	MK	1/1	ไม่มี	1.6	-	ไม่มี	7.7	-	-0.6	-1.5	0.56	-10.2	-10.4	0.13
28	KL	MK	1/1	12.2	10.6	1.00	-3.8	-4.5	0.44	ไม่มี	-10.5	-	ไม่มี	1.2	-
29	SU	BR	1/1	ไม่มี	-1.1	-	ไม่มี	-5.7	-	1.2	1.1	0.03	2.4	2.2	0.07
30	BR	PKC	1/1	24.0	23.6	0.17	2.4	1.6	0.40	ไม่มี	-23.3	-	ไม่มี	-4.9	-
31	KL	KK2	1/2	1.0	0.9	0.04	1.9	1.5	0.17	ไม่มี	-0.8	-	ไม่มี	-7.5	-
32	KL	KK2	2/2	1.0	0.9	0.04	1.9	1.5	0.17	ไม่มี	-0.8	-	ไม่มี	-7.5	-
33	MK	KK1	1/1	-5.1	-5.3	0.13	2.6	0.8	1.13	4.4	5.4	-0.54	-5.9	-7.1	0.65
34	KKU	KK1	1/1	ไม่มี	-3.7	-	ไม่มี	-3.3	-	3.8	3.8	0.00	2.9	2.8	0.05
35	KK1	BPI	1/1	44.2	45.8	-0.58	-4.4	-6.5	0.76	ไม่มี	-45.0	-	ไม่มี	5.5	-
36	KK1	KNG	1/1	34.2	42.5	-3.01	-8.8	-7.3	-0.54	-48.6	-40.3	-3.01	6.6	3.8	1.01
37	KK1	PO	1/1	19.9	14.1	2.10	-13.2	-13.6	0.14	ไม่มี	-13.5	-	ไม่มี	8.9	-
38	BPI	NR2	1/1	ไม่มี	18.5	-	ไม่มี	-15.5	-	-11.5	-17.8	2.63	3.6	4.8	-0.67
39	PO	CYP	1/1	-12.8	-12.9	0.05	1.6	1.5	0.05	ไม่มี	12.9	-	ไม่มี	-5.6	-
40	PO	NR1	1/1	20.4	16.3	1.37	-15.6	-18.1	0.83	-18.2	-15.0	-1.33	13.4	11.4	0.83
41	KNG	NR1	1/1	-15.5	-14.1	-0.51	-25.4	-24.5	-0.33	13.4	14.5	-0.46	22.1	21.5	0.25
42	NR2	NR1	1/2	32.6	32.8	-0.04	-1.4	-2.9	0.42	ไม่มี	-32.8	-	ไม่มี	-0.8	-
43	NR2	NR1	2/2	32.6	32.8	-0.04	-4.3	-2.9	-0.39	ไม่มี	-32.8	-	ไม่มี	-0.8	-
44	CYP	BNN	1/1	36.0	35.9	0.05	6.0	4.5	0.50	ไม่มี	-35.4	-	ไม่มี	-7.4	-
45	NR2	LTk	1/1	9.6	9.8	-0.08	5.6	6.0	-0.20	ไม่มี	-9.7	-	ไม่มี	-10.0	-
46	LTk	PCH	1/1	ไม่มี	12.9	-	ไม่มี	-0.7	-	ไม่มี	-12.9	-	ไม่มี	-1.0	-
47	PCH	SR2	1/1	ไม่มี	-25.6	-	ไม่มี	2.2	-	25.6	25.6	0.00	-1.3	-1.5	0.06
48	NR2	SKI	1/1	29.8	29.6	0.08	15.2	14.8	0.20	ไม่มี	-29.3	-	ไม่มี	-16.2	-
49	SR2	SKI	1/1	12.8	12.0	0.25	-3.8	-3.6	-0.06	-11.5	-12.0	0.31	1.0	0.4	0.50
50	KK1	CPA	1/1	21.0	22.0	-0.36	-3.3	-4.5	0.43	-20.8	-21.6	0.40	1.3	-1.1	1.50
51	KK1	UR	1/1	-5.9	-6.0	0.05	6.6	5.2	0.76	ไม่มี	6.1	-	ไม่มี	-9.1	-
52	KK1	NPO1	1/2	-10.3	-31.7	5.82	13.2	17.6	-1.20	32.0	32.1	-0.03	-19.2	-18.9	-0.15
53	KK1	NPO1	2/2	-30.9	-31.7	0.22	19.1	17.6	0.41	32.0	32.1	-0.03	-19.2	-18.9	-0.15

ตารางที่ 4 (ต่อ)

No.	สายส่ง		สายที่ / จำนวนสาย	$P_{ij}$ (MW)			$Q_{ij}$ (MVar)			$P_{ji}$ (MW)			$Q_{ji}$		
	บัส i	บัส j		ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y^{norm}$	ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y^{norm}$	ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y^{norm}$	ค่าวัด	ค่าประมาณ	$y^{norm}$
54	CLB	CPA	1/1	0.0	-0.2	0.12	0.7	-1.6	1.38	0.0	0.2	-0.10	-1.3	-2.3	0.63
55	UR	NPO1	1/1	ไม่มี	-7.1	-	ไม่มี	7.4	-	7.2	7.1	0.10	-9.3	-9.2	-0.13
56	NPO2	NPO1	1/2	19.2	19.2	0.00	-19.2	-17.9	-0.22	ไม่มี	-19.2	-	ไม่มี	17.3	-
57	NPO2	NPO1	2/2	19.2	19.2	0.00	-16.8	-17.9	0.18	ไม่มี	-19.2	-	ไม่มี	17.3	-
58	NPO1	UD2	1/2	-17.6	-16.6	-0.50	3.6	2.7	0.60	16.3	16.8	-0.21	-6.7	-8.8	0.88
59	NPO1	UD2	2/2	-16.8	-16.6	-0.10	3.6	2.7	0.60	16.3	16.8	-0.21	-6.7	-8.8	0.88
60	NPO1	UD1	1/2	-12.8	-13.5	0.35	3.0	2.2	0.53	13.4	13.7	-0.13	-6.7	-9.4	1.13
61	NPO1	UD1	2/2	-13.6	-13.5	-0.05	3.0	2.2	0.53	13.4	13.7	-0.13	-6.7	-9.4	1.13
62	LE	NBL	1/1	ไม่มี	-16.2	-	ไม่มี	0.6	-	17.3	16.4	0.38	-2.9	-6.0	1.29
63	NBL	UD1	1/1	ไม่มี	-27.1	-	ไม่มี	4.2	-	27.8	27.5	0.13	-5.8	-6.9	0.46
64	UD1	UD2	1/1	-5.8	-5.8	0.00	-8.6	-8.7	0.04	5.8	5.8	0.00	7.7	7.8	-0.04
65	UD1	NK	1/2	-30.7	-29.5	-0.50	18.2	16.2	0.83	32.6	30.9	0.71	-16.8	-17.8	0.50
66	UD1	NK	2/2	-45.1	-46.3	0.50	6.7	7.4	-0.29	46.1	47.3	-0.50	-6.7	-8.2	0.63
67	UD2	PHT	1/1	-45.1	-35.1	-4.17	7.7	4.4	1.38	ไม่มี	36.1	-	ไม่มี	-7.8	-
68	NK	PHT	1/2	-58.6	-57.7	-0.37	20.0	22.5	-1.04	ไม่มี	58.5	-	ไม่มี	-22.2	-
69	NK	PHT	2/2	-34.6	-25.5	-3.79	3.8	0.0	1.90	ไม่มี	25.6	-	ไม่มี	-1.6	-
70	UD2	NH	1/1	-4.8	-3.4	-0.47	0.0	1.0	-0.33	ไม่มี	3.4	-	ไม่มี	-3.4	-
71	UD2	PHK	1/1	-10.6	-12.0	0.58	0.0	-3.4	1.42	10.6	12.1	-0.63	-3.6	-3.6	0.00
72	NH	PHK	1/1	ไม่มี	-13.9	-	ไม่มี	-1.6	-	16.8	14.1	0.90	-1.2	-3.2	0.67
73	PHK	BKN	1/1	4.8	3.8	0.42	-1.9	-3.3	0.88	ไม่มี	-3.8	-	ไม่มี	-5.5	-
74	PHK	SO1	1/2	-26.4	-27.2	0.27	1.2	1.3	-0.03	ไม่มี	27.6	-	ไม่มี	-4.4	-
75	PHK	SO1	2/2	-24.0	-23.1	-0.37	2.9	3.3	-0.22	ไม่มี	23.5	-	ไม่มี	-6.8	-
76	SO1	SO2	1/2	-80.0	-79.7	-0.04	14.4	14.7	-0.05	ไม่มี	80.0	-	ไม่มี	-14.5	-
77	SO1	SO2	2/2	-80.0	-79.7	-0.04	14.4	14.7	-0.05	ไม่มี	80.0	-	ไม่มี	-14.5	-
78	SO1	NP	1/1	48.0	47.8	0.05	-6.4	-5.0	-0.35	ไม่มี	-47.4	-	ไม่มี	4.2	-
79	NP	SD	1/1	ไม่มี	45.7	-	ไม่มี	-10.2	-	-46.1	-44.9	-0.25	8.6	8.1	0.14
80	KL	SO1	1/1	-42.2	-40.3	-0.40	8.6	4.2	1.22	23.0	41.7	-7.79	-5.8	-10.3	1.88
81	KL	SD	1/1	-30.7	-29.5	-0.25	4.3	4.6	-0.08	ไม่มี	29.8	-	ไม่มี	-7.5	-
82	SO1	TH	1/1	5.3	5.5	-0.17	-4.8	-4.9	0.08	ไม่มี	-5.4	-	ไม่มี	-0.4	-
83	SO2	NN	1/1	-6.4	-1.4	-0.52	3.8	1.7	0.29	ไม่มี	1.5	-	ไม่มี	-6.8	-
84	MD	TH	1/1	-48.0	-48.5	0.13	7.2	8.9	-0.57	ไม่มี	49.2	-	ไม่มี	-9.9	-
85	TH	NN	1/1	ไม่มี	-32.5	-	ไม่มี	3.1	-	32.6	32.8	-0.08	-6.7	-6.6	-0.04
86	UB2	KTL	1/1	10.2	7.9	0.36	0.0	-6.0	1.25	ไม่มี	-7.9	-	ไม่มี	1.3	-

เมื่อได้ทำการทดสอบกับข้อมูลหลายเวลาพบว่าค่าวัดส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าประมาณ แต่ยังมีบางค่าวัดที่มีความผิดพลาดหรือมีความคลาดเคลื่อนจากค่าประมาณค่อนข้างสูง และจะผิดพลาดเป็นประจำหรือเกือบทุกเวลา โดยแสดงผลการทดสอบกับข้อมูลวันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2544 เวลา 6:00 น. ดังในตารางที่ 3 และ 4

จากผลที่ได้ในตารางที่ 3 แสดงค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการหาค่าประมาณสถานะเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ จะเห็นว่าที่บัส PO และ NR1 มี  $|y_i^{norm}|$  มากกว่า 3 จึงมีความน่าจะเป็นสูงที่จะเป็นค่าวัดที่ผิดพลาด สำหรับบัส PHT และ BYO เป็นบัสซึ่งไม่ทราบค่าวัดแรงดัน แต่จากการประมาณสถานะ สามารถหาค่าประมาณแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองบัสนี้ได้ ในทำนองเดียวกัน สำหรับตารางที่ 4 แสดงค่าประมาณของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ซึ่งสามารถดูความน่าจะเป็นของค่าวัดที่จะเป็นค่าวัดผิดพลาดได้จาก  $|y_i^{norm}|$

ผลจากการตรวจสอบเมื่อพิจารณาค่าวัดทั้ง 269 ค่าวัด จะเห็นว่าค่าวัดส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าประมาณที่ได้ โดยมี 9 ค่าวัดที่มีความน่าจะเป็นสูงที่จะเป็นค่าวัดที่ผิดพลาด ดังนี้ (ได้แสดงตำแหน่งของ bad - measurements (X) ในรูปที่ 5)

- 1) ค่าวัดขนาดแรงดันที่บัส PO
- 2) ค่าวัดขนาดแรงดันที่บัส NR1
- 3) ค่าวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส YT ไป UB1
- 4) ค่าวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส KK1 ไป KNG
- 5) ค่าวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส KNG ไป KK1
- 6) ค่าวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส KK1 ไป NPO1
- 7) ค่าวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส UD2 ไป PHT
- 8) ค่าวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส NK ไป PHT
- 9) ค่าวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส SO1 ไป KL

จะเห็นว่า ประโยชน์ของการหาค่าประมาณสถานะก็คือ สามารถหาค่าประมาณของปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ได้ถูกต้องมากกว่าค่าวัดที่อาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์วัดนั่นเอง และจากค่าประมาณที่ได้สามารถบ่งชี้ค่าวัดที่มีความน่าจะเป็นสูงที่จะเป็นค่าวัดที่ผิดพลาด และนอกจากนี้ประโยชน์ของการประมาณสถานะยังสามารถให้ค่าประมาณของปริมาณทางไฟฟ้า ในจุดที่ไม่ทราบค่าวัด หรือไม่มีอุปกรณ์วัดติดตั้งอยู่ในระบบ ได้เช่นกัน

## 5. สรุป

วิธีการประมาณสถานะเป็นการนำข้อมูล หรือค่าวัดที่ได้จากอุปกรณ์วัดในระบบ ซึ่งอาจยังมีค่าความผิดพลาดรวมอยู่ด้วย มาหาค่าประมาณของตัวแปรสถานะของระบบด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดถ่วงน้ำหนัก และนำตัวแปรสถานะที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งค่าที่ได้ี้ จะมีความผิดพลาดน้อยลง และสามารถนำไปตรวจสอบเพื่อหาค่าวัดที่มีความผิดพลาด โดยอาศัยทฤษฎีทางสถิติ แสดงระดับความน่าจะเป็น ของค่าวัดที่จะเป็นค่าวัดผิดพลาด และนอกจากนี้ประโยชน์ของการประมาณสถานะยังสามารถให้ค่าประมาณของปริมาณทางไฟฟ้า ในจุดที่ไม่ทราบค่าวัด หรือไม่มีอุปกรณ์วัดติดตั้งอยู่ในระบบ ได้เช่นกัน ซึ่งจะช่วยให้การควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งสนับสนุนข้อมูลสำหรับการวิจัย และ บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนเพื่อการศึกษาวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] George L. Kusic. Computer-Aided Power System Analysis, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. 1986.
- [2] Felix F Wu. "Power system state estimation : a survey", Electrical Power & Energy Systems. Vol. 12, No 2, April 1990, pp.80-87.
- [3] John J. Grainger , and William D. Stevenson. Power System Analysis, Singapore: McGraw- Hill, 1994.
- [4] Allen J. Woods , and Bruce F. Wollenberge. Power Generation Operation and Control, USA : John Wiley & Sons, 1996.
- [5] Hadi Saadat, Power System Analysis, Singapore: McGraw-Hill, 1999.