

ประมาณการสถานภาพของระบบกำลังไฟฟ้า

24 ก.ย. 2523

โดย

นายสุธี วรวิวัฒน์

บทย่อ

ในบทความนี้ได้ให้นิยามของประมาณการสถานภาพของระบบกำลังไฟฟ้าเอาไว้ ข้อแม้พื้นฐานที่ใช้ในการประมาณการเป็นการทำค่ากำลังสองของความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จากระบบให้มีค่าน้อยที่สุด วิธีประมาณการหลายวิธีพร้อมทั้งขั้นตอนในการคำนวณของบางวิธีได้รวบรวมเอาไว้ วิธีเหล่านี้ได้แก่ weighted least square, transformation ของตัวแปร การแยกแบบจำลอง การใช้ load flow เข้าช่วย เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังมีวิธีทดสอบสามวิธีในการหาข้อมูลที่เกิดผลจากค่าที่วัดได้ เพราะข้อมูลที่ผิดพลาดมีส่วนทำให้การประมาณการขาดความแม่นยำได้ การวางตำแหน่งของจุดวัดก็มีส่วนสำคัญในการเพิ่มความน่าเชื่อถือของประมาณการที่ได้ด้วย และบทสุดท้ายเป็นหลักเกณฑ์ในการที่จะใช้ตัวประมาณการสถานภาพของระบบกำลังไฟฟ้าในระบบ

1. ความนำ

ประมาณการที่ใช้ในที่นี้มีความหมายตรงกับคำว่า estimation ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติที่ใช้ในการคาดคะเนผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจากการวัดของผลที่เกิดขึ้นในอดีตได้ สถานภาพในที่นี้หมายถึง state ซึ่งเป็นจุดของตัวแปรที่มีจำนวนตัวแปรที่น้อยที่สุดที่สามารถบ่งบอกถึงสถานะของระบบใด ๆ ในทุกขณะได้ ดังนั้นการประมาณสถานภาพของระบบกำลังไฟฟ้าก็คือการคาดคะเนสถานะของระบบกำลังไฟฟ้าโดยอาศัยทฤษฎีทางด้านประมาณการของสถิติ ทฤษฎีทางการถ่ายเทพลังงานในระบบกำลังไฟฟ้า การวัดค่าต่าง ๆ จากส่วนต่าง ๆ ภายในระบบไฟฟ้า สิ่งสุดท้ายที่ขาดไม่ได้ก็คือระบบเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่สามารถย่อยข้อมูลและตัวประกอบต่าง ๆ ออกมาเป็นสถานภาพของระบบตามที่ต้องการ

ความคิดในการประมาณสถานภาพของระบบกำลังไฟฟ้าได้เริ่มเป็นรูปเป็นร่างขึ้นมาครั้งแรกในบริษัทไฟฟ้าหลายแห่งในสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2521 ในขณะนั้นกิจการสาธารณูปโภคทางด้านไฟฟ้ากำลังอยู่ในช่วงที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นเหตุให้ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีความซับซ้อนในการควบคุมระบบมากขึ้น ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างเกิดขึ้นมากกว่าเดิมจึงเป็นสาเหตุให้มีความต้องการของบริษัทไฟฟ้าเหล่านั้นในการที่จะทราบสถานภาพของระบบของตนเองให้ละเอียดและเชื่อถือได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อบริษัทไฟฟ้าต่างก็เริ่มต้นที่จะลงทุนในระบบการเก็บข้อมูลจากส่วนต่าง ๆ ภายในระบบไฟฟ้าของตนเองเพื่อจะให้ได้ข้อมูลที่เชื่อถือได้มากขึ้น และสร้างระบบสารสนเทศของระบบไฟฟ้า ประมาณการสถานภาพเป็นตัวจักรสำคัญในระบบสารสนเทศของระบบไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลจากระบบ

*

สารสนเทศนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ

2. ทฤษฎีค่าความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด

ระบบใด ๆ ที่วัดค่าต่าง ๆ ภายในระบบได้ สามารถที่จะจำลองแบบออกมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายที่สุดเป็นแบบจำลองเชิงเส้น วิธีค่าความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุดหรือ least square error method เรียกสั้น ๆ ว่าวิธี LS นี้เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งสามารถใช้ในการประมาณตัวแปรของแบบจำลองเชิงเส้นจากค่าที่วัดได้ชุดหนึ่งความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและแบบจำลองเมื่อยกกำลังสองแล้ว จะทำให้มีค่าน้อยที่สุด วิธีที่ใช้กับระบบกำลังไฟฟ้าแตกต่างมาจากวิธี LS เรียกว่า WLS หรือ Weighted least square โดยค่าที่ต้องทำให้มีค่าน้อยที่สุดจะมีส่วนประกอบที่ทำให้ความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวไม่เท่ากัน ในขณะที่วิธี LS ให้ความสำคัญของแต่ละตัวแปรเท่ากัน แบบจำลองเชิงเส้นจะอยู่ในรูปสมการ

$$\underline{z} = H\underline{x} + \underline{v} \quad (1)$$

โดย $\underline{z}$ ขนาด $(m \times 1)$ เป็นเวกเตอร์ประกอบด้วยค่าที่วัด

$\underline{x}$ ขนาด $(n \times 1)$ เป็นเวกเตอร์ของค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

$\underline{v}$ ขนาด $(m \times 1)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปร random ซึ่งมีค่าเฉลี่ยศูนย์ และ covariance matrix R ขนาด $(m \times m)$

H ขนาด $(m \times n)$ เป็น system matrix ซึ่งรู้ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในวิธี WLS ค่าที่ต้องทำให้มีค่าน้อยที่สุดก็คือ performance index

$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - H\underline{x})' R^{-1} (\underline{z} - H\underline{x}) \quad (2)$$

โดย $'$ แทน transposition ของ matrix

R^{-1} แทน inverse ของ R

$J(\underline{x})$ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ

$$\frac{dJ(\underline{x})}{d\underline{x}} = 0 \quad (3)$$

เมื่อหาอนุพันธ์ของ สมการ (2) แล้วแทนค่าลงในสมการ (3) จะได้

$$\begin{aligned} H'R^{-1}(\underline{z} - H\underline{x}) &= 0 \\ H'R^{-1}H\underline{x} &= H'R^{-1}\underline{z} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\underline{x} = (H'R^{-1}H)^{-1} H'R^{-1}\underline{z} \quad (5)$$

โดย $\underline{x}$ คือค่าประมาณได้ของตัวแปร

ผลพลอยได้จากการประมาณตัวแปร $\underline{x}$ เป็น covariance matrix

P_x ของ $\underline{x}$ ซึ่งได้จาก

$$\begin{aligned} P_x &= E \left\{ (\underline{x}-\underline{x}) (\underline{x}-\underline{x})^T \right\} \\ &= (H^T R^{-1} H)^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

โดย $E \{ \cdot \}$ แทนค่า expectation และได้ค่าประมาณของเวกเตอร์ $\hat{\underline{z}}$ พร้อมด้วย covariance matrix P_z ของ $\underline{z}$ ค่าทั้งสองคือ

$$\hat{\underline{z}} = H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \underline{z} = H \underline{x} \quad (7)$$

$$P_z = H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T = H P_x H^T \quad (8)$$

3. ลักษณะของตัวประมาณการสถานะภาพ

ตัวประมาณการสถานะภาพนั้นเป็นเพียง program คอมพิวเตอร์ชุดหนึ่ง ซึ่งจะเปลี่ยนข้อมูลที่วัดได้จากโหม่มาตรและข้อมูลเกี่ยวข้องอื่นๆ ของโครงสร้างของระบบกำลังไฟฟ้าขึ้น ให้เป็นประมาณการสถานะภาพที่เชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าขึ้น ๆ มันเป็นผลผลิตของการประสานเข้าด้วยกันของทฤษฎีการประมาณและทฤษฎีการคำนวณการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้า ความสำเร็จในขณะนี้ถึงเพียงขั้น quasi-static state ของระบบกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ส่วน dynamic state ของระบบไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงพฤติกรรม transient มีความสลับซับซ้อนมากกว่ามากเพราะว่าจะต้องมีตัวแปรของสถานะภาพชุดใหญ่กว่าและยังต้องใช้เวลาการคำนวณสั้นกว่า

สถานะภาพของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด N สะพานไฟ (bus) สามารถบ่งบอกได้อย่างเพียงพอด้วยตัวแปรจำนวน $2N-1$ ตัว ตัวแปรเหล่านี้สามารถเป็นค่าของส่วนจริง (real part) และส่วนสมมุติ (imaginary part) ของแรงดัน (voltage) ที่สะพานไฟทุกอัน ยกเว้นค่าสมมุติของสะพานไฟ swing ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือเป็นขนาด (magnitude) และมุม (phase) ของแรงดันที่สะพานไฟทุกอัน ยกเว้นมุมที่สะพานไฟ swing มีค่าเท่ากับศูนย์ ในกรณีหลัง เวกเตอร์ขนาด $(n \times 1)$ ของสถานะภาพ $\underline{x}$ ก็คือ

$$\underline{x} = (V_1, V_2, \dots, V_N, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_N)^T \quad (9)$$

โดย V_i เป็นขนาดของแรงดันที่สะพานไฟ i

δ_i เป็นมุมของแรงดันที่สะพานไฟ i

สะพานไฟหมายเลขหนึ่งเป็นสะพานไฟ swing และ n จะเท่ากับ $2N-1$

ค่าที่วัดได้จากส่วนต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าจะส่งมายังศูนย์ควบคุมเพื่อประมาณการสถานะภาพของระบบ ค่าที่วัดประกอบด้วย active และ reactive power injections active และ reactive power ที่ไหลในสายส่ง และขนาดของแรงดันตามสะพานไฟต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วมุมของแรงดันตามสะพานไฟจะไม่วัดกันเนื่องจากความลำบากในการวัด จำนวนค่าที่วัดจะต้องมากกว่าขนาดของตัวแปรสถานะภาพ ถ้าจัดจุดวัดให้อยู่กระจายตามส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าอย่างเหมาะสมแล้ว การมีจุดวัดมากกว่าจำนวนตัวแปรสถานะภาพทำให้ความเชื่อถือและความแม่นยำของประมาณการเพิ่มขึ้น ความมากเกินไปจะให้เป็นนิยามไว้

$$\eta = \frac{\text{จำนวนจุดวัด}}{\text{จำนวนตัวแปรสถานะภาพ}} \quad (10)$$

โดย η คือความมากเกินพอ

โดยทั่วไปแล้ว η จะมากกว่าหนึ่งจนมีค่าถึงสี่ เนื่องจากการวัดค่าแต่ละค่าตามจุดต่าง ๆ ในระบบต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในบางจุดที่ขาดค่าวัดจริง ๆ จากโพรมาเตอร์แล้ว ค่าวัดเทียม (pseudomeasurement) อาจนำมาใช้ประกอบกับค่าวัดที่ได้จากจุดอื่น ๆ ค่าวัดเทียมนี้ได้มาจากข้อมูลในอดีต การพยากรณ์ความต้องการควรกำลังไฟฟ้า หมายกำหนดการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความชำนาญของเจ้าหน้าที่ที่ควบคุม และจากแหล่งอื่น ๆ ค่าวัดเทียมเหล่านี้ไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำสูงนัก แต่ก็ควรจะมีความอยู่ภายในหลักเดียวกับค่าที่มันทดแทน ตัวอย่างของค่าวัดเทียมที่อาจใช้ได้ก็แก่ power injections ตามสะพานไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งต่อเท่านั้นซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าวัดจริงและเทียมจะประกอบกันขึ้นเป็นเวกเตอร์ของค่าวัด $\underline{z}$ ซึ่งมีขนาด $(m \times 1)$ โดย m มีค่ามากกว่า n

นอกจากเวกเตอร์ของค่าวัดแล้ว ตัวประมาณการสถานภาพยังต้องการข้อมูลเฉพาะตัวของระบบกำลังไฟฟ้าแต่ละแห่ง ข้อมูลเหล่านี้ประกอบด้วยโครงสร้างของข่ายระบบไฟฟ้าและอื่นๆ ของระบบ ข้อมูลทางด้านโครงสร้างของระบบเป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับตำแหน่งของสะพานไฟต่าง ๆ ตำแหน่งของสวิตช์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระบบไฟฟ้าได้ สถานภาพของสวิตช์เหล่านี้ซึ่งอาจเปิดหรือปิดอยู่จะต้องรับทราบด้วยทางโพรมาเตอร์ที่สถานีควบคุม ค่าอื่นๆ ในระบบได้รวมถึงค่า impedances ต่าง ๆ ในแบบจำลองของสายส่ง และ transformer ratios ของหม้อแปลงภายในระบบด้วย

ค่าวัดและสถานะภาพของระบบกำลังไฟฟ้าสัมพันธ์กันโดยอาศัยเวกเตอร์ฟังก์ชันซึ่งไม่เป็นลักษณะเชิงเส้น (nonlinear) ดังนี้

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{v} \quad (11)$$

$$\text{โดย } \underline{h}(\underline{x}) = (h_1(\underline{x}), h_2(\underline{x}), \dots, h_m(\underline{x}))'$$

และ $\underline{v}$ เป็น noise ในเครื่องวัดและช่องส่งโพรมาเตอร์ หรือค่าวัดเทียมที่ผิดพลาดรวมทั้งถึงความบกพร่องของแบบจำลองของข่ายระบบกำลังไฟฟ้า

4. ประมาณการโดยอาศัยวิธีความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด

วิธีพื้นฐานในการประมาณสถานภาพจากการวัดที่มากเกินพอจะใช้วิธี WLS กับแบบจำลองการวัดซึ่งปรับให้อยู่ในรูปเชิงเส้นแล้ว ซึ่งสามารถทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้ จากสมการ (11) แบบจำลองของค่าที่วัดเป็น

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{v}$$

กระจาย $\underline{h}(\underline{x})$ ออกรอบจุด $\underline{x}_1$ โดยอาศัยอนุกรม Taylor ออกเป็น

$$\underline{h}(\underline{x}) = \underline{h}(\underline{x}_1) + \underline{H}(\underline{x}_1) (\underline{x} - \underline{x}_1) + \text{พจน์อันดับสูงขึ้นไป}$$

$$\text{หรือ } \underline{h}(\underline{x}) \approx \underline{h}(\underline{x}_1) + \underline{H}(\underline{x}_1) (\underline{x} - \underline{x}_1) \quad (12)$$

$$\text{โดย } \underline{H}(\underline{x}_1) = \left. \frac{d\underline{h}(\underline{x})}{d\underline{x}} \right|_{\underline{x} = \underline{x}_1} \quad \text{โดย Jacobain matrix}$$

แทนค่า $h(\underline{x})$ จากสมการ (12) ลงในสมการ (11) จะได้

$$\underline{z} = h(\underline{x}_1) + H(\underline{x}_1)(\underline{x} - \underline{x}_1) + \underline{v} \quad (13)$$

จัดเรียงสมการ (13) เสียใหม่และให้

$$\underline{z}^{(i)} = \underline{z} - h(\underline{x}_1)$$

และ $\underline{x}_1 = \underline{x} - \underline{x}_1$ แล้ว

$$\underline{z}^{(i)} = H(\underline{x}_1)\Delta \underline{x}_1 + \underline{v} \quad (14)$$

สมการ (14) ขณะนี้จะมีรูปเหมือนกับสมการ (1) ดังนั้นประมาณการของ $\Delta \underline{x}_1$ จะได้จากการใช้สมการ (4) ดังนี้

$$H'(\underline{x}_1)R^{-1}H(\underline{x}_1)\Delta \underline{x}_1 = H'(\underline{x}_1)R^{-1}\underline{z}^{(i)} \quad (15)$$

$$\text{หรือ} \quad \underline{x}_1 = (H'(\underline{x}_1)R^{-1}H(\underline{x}_1))^{-1}H'(\underline{x}_1)R^{-1}\underline{z}^{(i)} \quad (16)$$

โดย R เป็น covariance matrix ของ $\underline{v}$

วิธีนี้เริ่มต้นจากการใช้ค่า $\underline{x}_0$ ซึ่งเดาค่าเอาเอง เมื่อใช้ $\underline{x}_0$ คำนวณเสร็จไปหนึ่งรอบแล้วจะได้ค่า $\underline{x}_0$ ซึ่งถ้าค่านี้มีขนาดเล็กไม่เพียงพอก็ต้องคำนวณรอบต่อไปเป็นรอบที่สองโดยใช้ค่า

$$\underline{x}_1 = \underline{x}_0 + \hat{\underline{x}}_0$$

เมื่อการคำนวณผ่านไป k รอบและ $\hat{\underline{x}}_k$ มีขนาดเล็กเพียงพอแล้ว ประมาณการสถานะภาพ $\hat{\underline{x}}$ ก็จะได้จาก

$$\hat{\underline{x}} = \underline{x}_k + \Delta \hat{\underline{x}}_k \quad (17)$$

สมการ (15) อาจเขียนให้อยู่ในรูป

$$G_i \underline{d}_i = \underline{b}_i \quad (18)$$

$$\text{โดย} \quad G_i = H'(\underline{x}_i)R^{-1}H(\underline{x}_i)$$

$$\underline{d}_i = \Delta \underline{x}_i$$

$$\underline{b}_i = H'(\underline{x}_i)R^{-1}(\underline{z} - h(\underline{x}_i))$$

วิธีแก้สมการ (18) โดยตรงทำได้โดยการใช้ square root factorization โดยการแยก matrix G ออกเป็น $G = \sqrt{G} \sqrt{G}'$ และ $\sqrt{G}$ ต้องเป็น lowertriangular matrix $\underline{d}$ จะสามารถหาได้โดยการแทนค่า forward และแทนค่า backward นั่นก็คือต้องแก้สมการหา

$\underline{y}$ จาก $\underline{JG}\underline{y}=\underline{b}$ แล้วแก้สมการ $\underline{JG}^*\underline{d}=\underline{y}$ เพื่อหา $\underline{d}$. การมีค่าศูนย์ใน matrix G และการจัดเรียงสมการให้มีอันดับที่เหมาะสมจะช่วยลดเวลาคำนวณลงได้ในระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ สำหรับระบบขนาดเล็กทั้งสองนี้เพียงช่วยลดเวลาคำนวณลงเล็กน้อยจึงทำให้ไม่คุ้มกับการเพิ่มความยุ่งยากในการจัดเรียงสมการและการมีค่าศูนย์อยู่ใน matrix G .

สมการ (18) ยังสามารถแก้โดยวิธีทาง numerical อื่น ๆ เช่น Gauss-seidal, Gauss-Jordan เป็นต้น ซึ่งก็ใช้การมีค่าศูนย์ในการ matrix G ด้วย อีกทางหนึ่งในการคำนวณซึ่งช่วยลดเวลาให้ใช้ matrix G เป็นค่าคงที่ในการคำนวณแต่ละรอบเช่นให้ $G=G_1=H'(\underline{x}_1)R^{-1}(\underline{x}_1)$ เป็นต้นแต่ในแนวทางนี้จะต้องเพิ่มจำนวนรอบการคำนวณก่อนที่จะมีค่าเข้าหาค่า ๆ หนึ่ง

สมการ (16) อาจเขียนได้ในรูป

$$\underline{d}_i = \underline{w}_i \underline{c}_i \quad (19)$$

โดย

$$\underline{w}_i = (H'(\underline{x}_i)R^{-1}H(\underline{x}_i))^{-1}H'(\underline{x}_i)R^{-1}$$

$$\underline{c}_i = \underline{z} - h(\underline{x}_i)$$

$\underline{d}_i$ หาได้จากการรู้ $\underline{w}_i$ แต่ก็เป็นวิธีที่ขาดประสิทธิภาพเนื่องจากการหา $\underline{w}_i$ จะต้องทำ matrix inversion ของ $H'(\underline{x}_i)R^{-1}H(\underline{x}_i)$ ทุกรอบที่คำนวณ วิธีการที่ทำได้ก็เป็นการใช้ค่าคงที่ $\underline{w}_0$ แทน $\underline{w}_i$ $\underline{w}_0$ จะเป็น matrix เดิมที่มีค่าเล็ก ๆ หลาย ๆ ค่า เมื่อให้ค่าเล็ก ๆ เหล่านั้นเป็นศูนย์ $\underline{w}_0$ กลายเป็น $\tilde{\underline{w}}_0$ สมการ (19) ก็กลายเป็น

$$\underline{d}_i = \tilde{\underline{w}}_0 \underline{c}_i \quad (20)$$

การใช้สมการ (20) มีข้อเสียอยู่ที่ว่าค่า $\tilde{\underline{w}}_0$ สามารถคำนวณไว้ก่อนได้ แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ค่าประมาณ $\hat{\underline{x}}$ ที่ได้ไม่อาจรับรองได้ว่าใกล้เคียงกับค่าซึ่งได้จากวิธี WLS ในทุกสภาพ

5. ประมวลการโดยใช้วิธีของ Load Flow เข้าช่วย

เวกเตอร์การวัด $\underline{z}$ ในวิธีนี้จะแยกออกเป็นสองส่วนเวกเตอร์ย่อย $\underline{z}^{(1)}$ และ $\underline{z}^{(2)}$ เวกเตอร์ $\underline{z}^{(1)}$ มีขนาด $((2N-1) \times 1)$ ส่วน $\underline{z}^{(2)}$ เป็นการวัดที่มากเกินไป มีขนาด $((m-(2N-1)) \times 1)$ ดังนั้นสมการ (11) กลายเป็น

$$\underline{z} = \begin{bmatrix} \underline{z}^{(1)} \\ \underline{z}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h^{(1)}(\underline{x}) \\ h^{(2)}(\underline{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{v}^{(1)} \\ \underline{v}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

ใช้วิธีและโปรแกรม load flow ในการหาค่า $\hat{\underline{x}}_0$ จากการแก้สมการ

$$\underline{z}^{(1)} = h^{(1)}(\underline{x}_0) \quad (22)$$

ค่าวัดที่เหลือในเวกเตอร์ $\underline{z}^{(2)}$ จะใช้คำนวณต่อไปทีละตัวเพื่อหาค่าประมาณที่ได้ดีขึ้น โดยอาศัยสมการ

$$\hat{\underline{x}}_k = \hat{\underline{x}}_{k-1} + \underline{w}_k (\underline{z}^{(2)} - H_k \underline{x}_{k-1}) \quad (23)$$

$$P_k = (I - W_k H_k) P_{k-1} \quad (24)$$

$$W_k = P_{k-1} H_k' (\sigma_k^2 + H_k P_{k-1} H_k')^{-1} \quad (25)$$

โดย $\hat{x}_k$ = ค่าประมาณสถานะภาพภายหลังจากใช้ค่าวัดไป ค่าใน

P_k = covariance matrix ที่เกี่ยวข้อง

$z_k^{(2)}$ = ค่าวัดตัวที่ k ใน $z^{(2)}$

σ_k^2 = variance ของ noise ในการวัดค่าที่ k ของ $z^{(2)}$

W_k = Weighting เวกเตอร์ของค่าวัดที่วัดที่ k ของ $z^{(2)}$

$$\text{และ } P_0 = (H^{(1)} R^{(1)} - I H^{(1)})^{-1} \quad (26)$$

วิธีนี้มีข้อดีจากการใช้โปรแกรมทาง load flow ซึ่งได้รับการพัฒนาเป็นอย่างดีแล้ว ข้อเสียเกิดจากความลำบากในการเลือกค่าวัดใดควรอยู่ในเวกเตอร์ $z^{(1)}$ และวิธีการนี้จะไร้ผลถ้ามีข้อมูลที่ไม่ดีและโครงสร้างที่ผิด

6. ประมาณการโดยวิธี Transformation ของตัวแปรช่วย

ในวิธีที่กล่าวไปแล้วความสัมพันธ์ระหว่างการวัดกับตัวแปรสถานะภาพไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องทำให้สมการเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยการกระจายของอนุกรม Taylor การคำนวณแต่ละรอบจึงต้องหา gain matrix วิธี Transformation เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าที่วัดไปเป็นตัวแปรชุดใหม่โดยอาศัย Transformation ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้ตัวแปรชุดใหม่มีความสัมพันธ์กับสถานะภาพที่เป็นเชิงเส้น ความคิดนี้ค่อนข้างประยุกต์ใช้กับค่าวัดการถ่วงเทก้าลงในสายส่งเท่านั้น แต่ต่อมาก็ขยายออกไปใช้กับค่าวัดที่เป็น power injection แรงดันสะพานไฟและกระแสในสายส่งด้วย การเปลี่ยนแปลงกระทำด้วยเวกเตอร์ฟังก์ชัน g โดย

$$\underline{\tilde{z}} = g(\underline{z}, \underline{x}) \quad (27)$$

โดย $\underline{\tilde{z}}$ แทนค่าวัดที่ได้เปลี่ยนแปลงแล้ว

ภายหลังการเปลี่ยนแปลง $\underline{z}$ และ $\underline{x}$ มีความสัมพันธ์กันโดย

$$\underline{\tilde{z}} = B\underline{x} + \underline{v} \quad (28)$$

โดย B เป็น matrix ที่มีค่าคงที่

ฟังก์ชัน g สำหรับเปลี่ยนแปลงค่าวัดต่าง ๆ มีนิยามดังนี้

สำหรับกำลังที่ไหลในสายส่ง

$$\tilde{z}_R = (P_{ij} E_i + Q_{ij} F_i) / (E_i^2 + F_i^2) \quad (29)$$

$$\tilde{z}_I = (-P_{ij} F_i + Q_{ij} E_i) / (E_i^2 + F_i^2) \quad (30)$$

โดย $\tilde{z}_R =$ ส่วนจริงของค่าวัดที่เปลี่ยนแปลงแล้ว
 $\tilde{z}_I =$ ส่วนสมมุติของค่าวัดที่เปลี่ยนแปลงแล้ว
 $P_{ij} =$ active power ที่ไหลออกจากสะพานไฟที่ i ไปยัง j ทางด้านสะพานไฟ i
 $Q_{ij} =$ reactive power ที่ไหลออกจากสะพานไฟที่ i ไปยัง j ทางด้านสะพานไฟ i
 $E_i =$ ส่วนจริงของแรงดันไฟฟ้าที่สะพานไฟ i
 $F_i =$ ส่วนสมมุติของแรงดันไฟฟ้าที่สะพานไฟ i

สำหรับ power injection ที่ i คือ P_i และ Q_i จะใช้ P_{ij} และ Q_{ij} แทนโดยอาศัย

$$P_i = \sum_{j \in \alpha_i} P_{ij} \quad (31)$$

$$Q_i = \sum_{j \in \alpha_i} Q_{ij} \quad (32)$$

โดย α_i เป็นเซตของครรรชนีของสายส่งที่ต่อมายังสะพานไฟ i

จากนั้นก็ใช้สมการ (29) และ (30) โดยใช้ $\sum_{j \in \alpha_i} P_{ij}$ และ $\sum_{j \in \alpha_i} Q_{ij}$

แทน P_{ij} และ Q_{ij} ในสมการนั้น

สำหรับขนาดของแรงดันที่สะพานไฟ ให้ใช้

$$\tilde{z}_R = \frac{|V_i|^2}{2} \frac{E_i}{(E_i^2 + F_i^2)} \quad (33)$$

$$\tilde{z}_I = \frac{|V_i|^2}{2} \frac{F_i}{(E_i^2 + F_i^2)} \quad (34)$$

ค่าที่ต้องทำให้น้อยที่สุดคือ

$$J(\underline{x}) = (\underline{\tilde{z}} - B\underline{x})' R^{-1} \underline{\tilde{z}} (\underline{\tilde{z}} - B\underline{x}) \quad (35)$$

differentiation ของสมการ (35) จะได้

$$\frac{dJ(\underline{x})}{d\underline{x}} = 2 \left(\frac{d\underline{\tilde{z}}}{d\underline{x}} - B \right) R^{-1} \underline{\tilde{z}} (\underline{\tilde{z}} - B\underline{x}) = 0 \quad (36)$$

ละทิ้งพจน์ $\frac{d\underline{\tilde{z}}}{d\underline{x}}$ ในสมการ (36) แล้วแทนค่า $\underline{\tilde{z}}$ จากสมการ (27) จะได้

$$B'R^{-1}\underline{\tilde{z}}B\underline{\hat{x}} = B'R^{-1}\underline{\tilde{z}}g(\underline{\hat{x}}, \underline{z}) \quad (37)$$

สำหรับการคำนวณหลาย ๆ รอบสมการ (37) ต้องแปลงเป็น

$$B'R^{-1}\underline{\tilde{z}}B\underline{\hat{x}}_{k+1} = B'R^{-1}\underline{\tilde{z}}g(\underline{\hat{x}}_k, \underline{z}) \quad (38)$$

การแก้สมการ (38) นี้ก็ทำได้เช่นเดียวกับที่ได้ไว้ สำหรับสมการ (18) เพียงแต่ในกรณีนี้ gain matrix มีค่าคงที่ซึ่งช่วยให้การคำนวณเร็วขึ้น

7. ประมาณการโดยวิธีแตกแยกแบบจำลอง

ในระบบกำลังไฟฟ้านั้น ตัวแปร real power P , มุมของแรงดัน δ , reactive power Q และขนาดของแรงดัน V มีความสัมพันธ์กันไปหมด แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง P - δ และ Q - V นั้นเป็นการเกี่ยวพันที่ค่อนข้างจะแน่นหนามากกว่าความสัมพันธ์ข้ามคู่ทั้งสอง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่อ่อนมาก ด้วยเหตุนี้แบบจำลองของการวัดจึงอาจแตกแยกออกเป็นสองส่วนได้เป็นระบบย่อย active และ reactive โดยระบบย่อย active จะประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง P และ δ ส่วนระบบย่อย reactive ก็เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ V แบบจำลองการวัดของทั้งสองเป็นดังต่อไปนี้

$$\underline{z}_p = \underline{h}_p(\underline{x}) + \underline{v}_p \quad (39)$$

$$\underline{z}_q = \underline{h}_q(\underline{x}) + \underline{v}_q \quad (40)$$

โดย $\underline{z}_p$ เป็นเวกเตอร์ค่าวัดของระบบย่อย active

และ $\underline{z}_q$ เป็นเวกเตอร์ค่าวัดของระบบย่อย reactive

$\underline{z}_p$ จึงประกอบไปด้วย active power injections และ active line flows ส่วน $\underline{z}_q$ ประกอบไปด้วย reactive power injections, reactive line flows และขนาดของแรงดัน โดยอาศัย WLS จะได้สมการสำหรับการคำนวณหลาย ๆ รอบดังนี้

$$(\underline{H}_p' \underline{R}_p^{-1} \underline{H}_p) (\underline{\delta}_{k+1} - \underline{\delta}_k) = \underline{H}_p' \underline{R}_p^{-1} (\underline{z}_p - \underline{h}_p(\underline{v}_k, \underline{\delta}_k)) \quad (41)$$

$$(\underline{H}_q' \underline{R}_q^{-1} \underline{H}_q) (\underline{V}_{k+1} - \underline{V}_k) = \underline{H}_q' \underline{R}_q^{-1} (\underline{z}_q - \underline{h}_q(\underline{v}_k, \underline{\delta}_k)) \quad (42)$$

โดยตัวอักษรต่าง ๆ ในสมการทั้งสองมีความหมายเช่นเดียวกับที่ได้ให้ไว้ในบทก่อน ๆ สมการทั้งสองนี้สามารถแก้หา $\underline{V}$ และ $\underline{\delta}$ ได้ในทำนองเดียวกับสมการ (18)

8. ประมาณการโดยการแบ่งย่อยระบบ

วิธีนี้ใช้แนวความคิดของทฤษฎีระบบ hierarchy ซึ่งเป็นวิธีการแบ่งระบบออกเป็นชั้น ๆ ตามความสำคัญ เมื่อนำมาใช้ในระบบกำลังไฟฟ้า จะแบ่งระบบกำลังไฟฟ้าออกเป็นสองระดับคือ ระดับระบบทั้งหมดกับระดับระบบย่อยลงไป ระบบย่อยแต่ละแห่งจะแบ่งตามแนวภูมิศาสตร์ก็ได้ หรือแบ่งตามเขตที่ควบคุมโดยการไฟฟ้าแห่งหนึ่งก็ได้โดยวิธีการนี้ระบบขนาดใหญ่ ซึ่งมีความยุ่งยากและลำบากในการประมาณสถานะภาพก็แปรเปลี่ยนไปเป็นการประมาณสถานะภาพของระบบย่อย ๆ หลาย ๆ อัน และเพื่อให้ผลของการต่อเชื่อมกันระหว่างเขตต่าง ๆ มีอยู่ในการประมาณการด้วย จึงมีตัวแปร 2 ชุดอยู่ในการประมาณการเพิ่มเติมมาด้วยให้ตัวแปร 2 ชุดนั้นเป็นเวกเตอร์ $\underline{s}$ และ $\underline{t}$ $\underline{s}$ เป็นตัวแปรใช้สำหรับ

ทดแทนความเกี่ยวเนื่องของระบบย่อย ส่วน $\underline{t}$ จะแทนขีดจำกัดต่าง ๆ ในการเชื่อมโยงระหว่างระบบย่อยในค่าที่จะต้องทำให้น้อยที่สุด ดังนั้น $\underline{s}$ จึงเป็นสื่อกลางของแบบจำลองส่วน $\underline{t}$ เป็นสื่อกลางของจุดมุ่งหมาย ค่าที่ต้องทำให้น้อยที่สุดของระบบย่อยแต่ละอันจึงเปลี่ยนแปลงไปตามการเชื่อมโยงกับระบบอื่นโดยเวกเตอร์ $\underline{s}$ และ $\underline{t}$ วิธีการโดยทั่วไปก็คือประมาณการของสถานภาพในระบบย่อยต่าง ๆ ก่อนแล้วจึงนำไปหา $\underline{s}$ และ $\underline{t}$ ค่าใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณรอบต่อไป การคำนวณจะหยุดก็เมื่อสถานภาพที่คำนวณได้มุ่งไปหาค่าสุดท้ายแล้ว วิธีการนี้นอกจากทำให้การแก้ปัญหาทางง่ายขึ้นเพราะเป็นระบบย่อยแล้วยังช่วยให้ประหยัดส่วนเก็บความจำที่จะต้องใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์อีกด้วย

9. ตัวประมาณการแบบต่อเนื่อง

วิธีประมาณการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วจะใช้ค่าวัด $\underline{z}$ ที่เวลาขณะหนึ่งใดเพียงชุดเดียวในการประมาณสถานภาพของระบบ ตัวประมาณแบบต่อเนื่องนี้จะใช้ประมาณพฤติกรรม steady-state ของระบบไฟฟ้ากำลังที่แปรผันไปกับเวลาโดยอาศัยการวัด $\underline{z}$ ต่อเนื่องกับหลาย ๆ ชุด ซึ่งแทนได้ด้วย

$$\underline{z}(t_k) = \underline{h}(\underline{x}(t_k)) + \underline{v}(t_k) \quad k = 0, 1, \dots \quad (43)$$

ตัวประมาณแบบต่อเนื่องอาจพิจารณาใช้แทนตัวประมาณแบบ dynamic ได้เพราะว่าแบบจำลอง dynamic ยังไม่มี มันสามารถบ่งบอกลักษณะที่แปรผันไปอย่างช้าๆกับเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นจึงสามารถทำงานได้อย่างดีภายใต้ภาวะ quasi-static ในวิธีนี้ค่าวัด $\underline{z}$ ที่เวลาขณะหนึ่งจะใช้ประมาณสถานภาพของระบบที่เวลานั้น เมื่อช่วงเวลาระหว่างค่าวัด 2 ชุดสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของภาวะ static แล้ว ค่า $\underline{x}(t_k) - \underline{x}(t_{k-1})$ ก็จะมีขนาดเล็ก ดังนั้นการคำนวณจึงทำเพียงรอบเดียวก็เพียงพอที่จะประมาณสถานภาพจากค่าวัดชุดหนึ่ง ๆ โดยอาศัยสถานภาพที่ประมาณได้จากค่าวัดชุดก่อนเป็นค่าเริ่มต้น วิธีการคำนวณอาศัยสมการต่อไปนี้

$$\underline{H}'(\underline{x}(t_k)) \underline{R}^{-1} \underline{H}(\underline{x}(t_k)) (\underline{x}(t_{k+1}) - \underline{x}(t_k)) = \underline{H}'(\underline{x}(t_k)) \underline{R}^{-1} (\underline{z}(t_{k+1}) - \underline{h}(\underline{x}(t_k))) \quad (44)$$

โดยตัวอักษรต่าง ๆ มีความหมายเช่นเดียวกับที่ได้ให้ไว้

10. ตัวประมาณการแบบ dynamic อย่างง่าย

ตัวประมาณการแบบ dynamic ที่ถูกต้องยังไม่มีเพราะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของสถานภาพกับเวลา ยังไม่ได้รับการพัฒนา แบบจำลอง dynamic อย่างง่ายที่สุดก็คือการสมมุติให้แบบจำลอง dynamic มีจำนวนตัวแปรในสถานภาพเท่ากับแบบจำลอง steady-state โดยความเป็นจริงแล้วแบบจำลอง dynamic ต้องการตัวแปรจำนวนมากกว่าในเวกเตอร์ของสถานภาพแบบจำลอง dynamic อย่างง่ายให้ไว้ดังนี้คือ

$$\underline{x}(t_{k+1}) = \underline{x}(t_k) + \underline{w}(t_k) \quad k=0, 1, \dots \quad (45)$$

และ
$$\underline{z}(t_k) = \underline{h}(\underline{x}(t_k)) + \underline{v}(t_k) \quad (46)$$

สมมุติให้ตัว random disturbance $\underline{w}$ และ noise จากการวัด $\underline{v}$ ต่างก็มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมี diagonal covarianc matrix ทำสมการ (43) ให้เป็นสมการเชิงเส้นโดยอาศัยการกระจายของอนุกรม Taylor รอบจุด $\underline{x}_0$ และตัวพจน์อันดับสูงทั้งแล้วจะได้

$$\underline{z}(t_k) = h(\underline{x}_0) + H(\underline{x}(t_k) - \underline{x}_0) + \underline{v}(t_k)$$

หรือ
$$\underline{z}(t_k) - h(\underline{x}_0) = H(\underline{x}(t_k) - \underline{x}_0) + \underline{v}(t_k) \quad (46)$$

โดย
$$H = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x = x_0}$$

อาศัยวิธีการของ Kalman filter กับสมการ (45) และ (46) จะได้สมการ สำหรับการคำนวณหลาย ๆ รอบดังนี้

$$\hat{\underline{x}}(t_{k+1}) = \hat{\underline{x}}(t_k) + K(t_{k+1}) (\underline{z}(t_{k+1}) - H\hat{\underline{x}}(t_{k+1})) \quad (47)$$

$$K(t_{k+1}) = (P(t_k) + R_w(t_k)) H' (R_v + H(P(t_k) + R_w(t_k)) H')^{-1} \quad (48)$$

$$P(t_{k+1}) = (I - K(t_{k+1}) H) (P(t_k) + R_w(t_k)) \quad (49)$$

โดยใช้ $\underline{x}(t_k)$ แทน $\underline{x}(t_k) - \underline{x}_0$ สมการ (46)

R_w และ R_v เป็น corariance matrix ของ $\underline{w}$ และ $\underline{v}$, I เป็น identity matrix

11. การตรวจหาที่ผิดพลาด

ในบทนี้จะใช้ประมาณการที่ได้ในการ หาค่าวัดที่ผิดพลาดและความผิดพลาดในโครงสร้างของระบบ การตรวจหาใช้วิธีการทดสอบสมมุติฐานซึ่งทดสอบความถูกต้องของสมมุติฐาน H_0 ซึ่งเรียกว่าสมมุติฐานศูนย์แข่งกับสมมุติฐาน H_1 สมมุติฐานทั้งสองได้แก่

H_0 ; ไม่มีความผิดพลาดของค่าวัดหรือโครงสร้างระบบ

H_1 : H_0 ไม่เป็นจริง

การทดสอบสมมุติฐานมีหลายวิธี วิธีการหนึ่งได้แก่ "การทดสอบ $J(\hat{\underline{x}})$ " $J(\hat{\underline{x}})$ เป็นค่ากำลังสองของค่าผิดพลาดนั้นคือ

$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - h(\underline{x}))' R^{-1} (\underline{z} - h(\underline{x}))$$

$$J(\hat{\underline{x}}) = \underline{v}' R^{-1} W \underline{v}$$

$$\text{โดย } W = I - H(H'R^{-1}H)^{-1}H'R^{-1}$$

ถ้า $\underline{v}$ มีการกระจายแบบ normal แล้ว $J(\hat{\underline{x}})$ ก็จะมีการกระจายแบบ χ^2 ที่มี $m-n$ degree of freedom เมื่อ $m - n$ มีค่ามาก ตัวแปรมาตรฐาน random

$$\chi_1 = (J(\hat{\underline{x}}) - (m-n)) / \sqrt{2(m-n)} \quad (51)$$

$$\chi_2 = \sqrt{2J(\hat{\underline{x}})} - \sqrt{2(m-n)} \quad (52)$$

กลายเป็นตัวแปรที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์ และมี variance เป็นหนึ่งนั่นก็คือ $N(0,1)$ การทดสอบมีอยู่ว่า

ให้ยอมรับ H_0 ถ้า $\chi_1 < \gamma$ (หรือ $\chi_2 < \gamma$)

ไม่ยอมรับ H_0 (นั่นคือยอมรับ H_1) ถ้าไม่เป็นไปตามอันแรก

γ เป็นระดับที่ใช้ตรวจหาความผิดพลาด การเลือกค่า γ จะเป็นตัวกำหนด probability ของการเกิดพบที่ผิดพลาดทั้ง ๆ ที่ไม่มีอะไรคิดเลย

วิธีที่สองเป็น "การทดสอบ $\hat{\underline{x}}_N$ " $\hat{\underline{x}}$ เป็นเวกเตอร์เศษเหลือซึ่งนิยามว่า

$$\hat{\underline{x}} \triangleq \underline{z} - \hat{\underline{z}} \quad (53)$$

ให้นิยามของ diagonal matrix D ว่า

$$D = \text{diag} (R - H(H'R^{-1}H)^{-1}H') \quad (54)$$

เศษเหลือที่ normalized แล้วก็คือ

$$\hat{\underline{x}}_N = \sqrt{d^{-1}} \hat{\underline{x}} \quad (55)$$

ในการทดสอบวิธีนี้ทุก ๆ ค่าของเวกเตอร์ $\hat{\underline{x}}_N$ จะทดสอบ การทดสอบมีอยู่ว่า

ให้รับ H_0 ถ้า $|x_{N,k}| < \gamma$ $k = 1, 2, \dots, m$

ให้ยอมรับ H_1 แทนถ้าไม่เป็นไปตามอันแรก

วิธีที่สามเป็น "การทดสอบ $\hat{\underline{x}}_W$ " $\hat{\underline{x}}$ เป็นเศษเหลือที่กลั่นกรองแล้ว โดยมี

นิยามว่า

$$\hat{\underline{x}}_W = \sqrt{R^{-1}} \hat{\underline{x}} \quad (56)$$

การทดสอบมีอยู่ว่า

ให้ยอมรับ H_0 ถ้า $|x_{W,k}| < \gamma$ $k=1, 2, \dots, m$

ให้ยอมรับ H_1 แทนในกรณีอื่น ๆ

วิธีทดสอบทั้งสามมีส่วนดีและส่วนเสีย ดังนั้นจึงควรจะใช้การทดสอบสองวิธี โดยให้ใช้การทดสอบ $\sigma(\underline{x})$ และ $\underline{x}_N$ หรือการทดสอบ $\sigma(\underline{x})$ และ $\underline{x}_W$ คู่ใดคู่หนึ่ง การพบความผิดพลาดใด ๆ เกิดขึ้นเมื่อการทดสอบอันหนึ่งอันใดในแต่ละคู่ยอมรับสมมติฐาน H_1 เมื่อพบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะต้องค้นหาในส่วนเหลือ $\underline{x}$ เพื่อหาว่าค่าวัดใดหรือโครงสร้างระบบในส่วนไหนที่เกิดผิดพลาดขึ้น ความผิดพลาดในโครงสร้างของระบบโดยทั่วไปจะหาได้ยากกว่า เมื่อความผิดพลาดเกิดขึ้นในค่าวัดค่าที่ผิดพลาดจะต้องคัดทิ้งไป และใช้วัดที่เหลือในการประมาณใหม่อีก ในการตีความผิดพลาดในโครงสร้างจะต้องปรับฟังก์ชันใหม่ก่อนที่จะเริ่มประมาณใหม่.

12. ตำแหน่งของจุดวัดในระบบ

ปัญหาของจุดวัดเป็นปัญหาในการเลือกจำนวนจุดวัด, เลือกค่าที่วัด, ตำแหน่งของจุดวัด, และความละเอียดถูกต้องของโทรมาตร ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสะพานไฟ N แห่งและสายส่ง M เส้น จะมีค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ $5M+4N-4$ ตัว ถ้านับเฉพาะ power injections, line flows ขนาดของแรงดันของสะพานไฟจะได้ค่าที่วัดได้ $4M+3N-3$ ค่า ส่วนหนึ่งของค่าทั้งหมดนี้จะต้องเลือกไว้เป็นจุดวัดจริงเพื่อใช้ในการประมาณการสถานะภาพเพื่อให้ความผิดพลาดน้อยที่สุดภายใต้วิธีหาความผิดพลาดที่กำหนดไว้ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโทรมาตรมีน้อยที่สุด ขั้นตอนการคำนวณมีเสถียรภาพซึ่งหมายถึงการคำนวณจะได้ค่ามุ่งเข้าหาค่าสุดท้าย และความเชื่อถือได้ของค่าประมาณการสามารถรักษาไว้ได้ในกรณีที่เกิดการสูญเสียค่าวัดบางค่า ความเกินพอของค่าวัดเพียงพออย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพของระบบโทรมาตรที่มีอยู่

วิธีการกำหนดตำแหน่งจุดวัดสามารถแยกแยะออกเป็น 4 แบบด้วยกัน แบบแรกเป็นวิธี "trial and error" ซึ่งเป็นการเลือกจุดวัดตามตำแหน่งต่าง ๆ เป็นชุด ๆ ไป การวางตำแหน่งของโทรมาตรอาจอาศัยประสบการณ์หรือสุ่มเอาก็ได้ โดยวิธีการ simulation ตำแหน่งจุดวัดชุดต่าง ๆ ได้รับการทดสอบการทำงานในสภาพที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงเพื่อเลือกเอาจุดวัดชุดที่ดีที่สุดตามข้อกำหนดที่ได้ตั้งเอาไว้ ในแบบที่สองจะกำจัดจุดวัดออกไปทีละจุดอย่างมีแบบแผนจุดวัดที่มีผลน้อยที่สุดต่อค่าความผิดพลาดกำลังสองซึ่งต้องทำให้น้อยที่สุดจะตัดออกไปทีละจุด วิธีนี้จะสิ้นเปลืองเวลามาก เพราะต้องทำการวิธีเดียวกันซ้ำแล้วซ้ำอีกหลาย ๆ ครั้ง แบบที่สามใช้ observability criterion ซึ่งใช้หลักการของ observability ในการเลือกจุดวัดเพิ่มเติมจากที่มีอยู่เดิมในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นแบบสุดท้ายเป็นการใช้ทฤษฎี information ซึ่งมีข้อกำหนดให้หาค่าผิดพลาดของประมาณการให้น้อยที่สุดหาค่า information ของเวกเตอร์สถานะภาพจากการวัดสูงที่สุด ค่าใช้จ่ายในการสร้างโทรมาตรและความละเอียดถูกต้องของการวัดได้รวมไว้ด้วย ซึ่งทำให้วิธีนี้เป็นปัญหาทางด้าน nonlinear programming

13. การนำไปใช้

ในการนำตัวประมาณการสถานะภาพมาใช้กับระบบกำลังไฟฟ้าใด ๆ สามารถแบ่งอย่างง่าย ๆ ออกเป็น 2 ระยะด้วยกัน ระยะแรกเป็นการศึกษา offline ก่อนจึงต่อไปยังระยะที่สองซึ่งเป็นการใช้ online ในระยะ offline จะต้องวางคุณสมบัติของตัวประมาณการ เลือกจำนวน,

ชนิด, ความละเอียดถูกต้องและตำแหน่งของจุดวัดต่าง ๆ เลือกวิธีการคำนวณสองหรือสามแบบจากที่มีอยู่มากมาย ทดสอบขั้นตอนการคำนวณที่เลือกเอาไว้กับโครงสร้างของระบบ, ค่าที่แท้จริงต่าง ๆ ของระบบ, ค่าวัดที่สร้างขึ้นโดยอาศัยจากค่าวัดที่วัดไว้ในอดีต เปรียบเทียบวิธีคำนวณต่าง ๆ ในด้าน เวลาคำนวณ, ความถูกต้อง, จำนวนรอบในการคำนวณสำหรับการประมาณการครั้งแรกและครั้งต่อไป, และจำนวนเนื้อที่ในหน่วยเก็บความจำที่ต้องใช้และเลือกขั้นตอนการคำนวณที่ดีที่สุด

ในการใช้ online นั้นควรแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นแรกเกี่ยวกับการย่อข้อมูลและแสดงผล มีงานอยู่หลายส่วนในขั้นนี้ได้แก่การนำข้อมูลทางโทรมาตรมาใช้ การให้พนักงานในศูนย์ควบคุมคุ้นเคยกับระบบใหม่พร้อมทั้งให้เกิดความชำนาญงานด้วย การตั้งความถี่ของค่าวัดที่จะได้ทางโทรมาตรและความถี่ที่จะต้องประมาณสถานภาพ สามารถเปลี่ยนแปลงโปรแกรมเพื่อให้เข้ากับจุดวัดที่ไม่ดีได้ และสามารถเลือกการแสดงผลบนจอวิดีโอในรูปร่างต่าง ๆ กันได้เพื่อให้ผลที่ปรากฏบนจอวิดีโอเป็นประโยชน์มากที่สุด

ในขั้นที่สองจะเกี่ยวกับการใช้ทำ security monitoring และการประเมินระบบกำลังไฟฟ้า ค่าต่าง ๆ ที่ประมาณการเช่น line flows เป็นต้น จะนำไปเปรียบเทียบกับความสามารถสูงสุดที่มีอยู่ และผลของมันก็จะแสดงออกมาทางจอภาพ ถ้าสถานภาพในขณะนั้นใกล้เคียงกับความสามารถสูงสุดแล้วก็จะให้ทางเลือกแก่พนักงานควบคุม เช่น ใส่สัด loads บางอันหรือ ติดต่อสวิตช์ใหม่ การประเมินความมั่นคงของระบบไฟฟ้าสามารถทำได้โดยอาศัย databade ที่มีอยู่ซึ่งบางส่วนได้จากการประมาณสถานภาพ

ในขั้นที่สามควรจะใช้ประโยชน์สูงสุดจากการประมาณสถานภาพเช่นการควบคุมอย่างดีที่สุดของระบบไฟฟ้า นำวิธีการไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองในการทำนายระบบในอนาคตและสำหรับการคาดคะเน load ในระยะสั้นให้ข้อมูลสำหรับการควบคุมความถี่และการจ่าย load อย่างประหยัดซึ่งเมื่อนั้นแล้วก็จะกลายเป็นการควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์อย่างสมบูรณ์แบบ

14. สรุป

การประมาณสถานภาพเริ่มต้นจากความคิดใช้ทฤษฎีทางด้านประมาณการ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของค่าวัดที่เกินพอในระบบกำลังไฟฟ้า จนกลายเป็นวิธีการที่ยอมรับกันโดยทั่วไปและในขณะนี้มีการใช้อยู่ทั่วไปโดยบริษัทไฟฟ้าในสหรัฐอเมริกา, ในยุโรปและในญี่ปุ่น สำหรับในประเทศไทยนั้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตได้เริ่มใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าในภาคต่าง ๆ ซึ่งเชื่อมโยงถึงกันหมด การประมาณสถานภาพก็เป็นฟังก์ชันอันหนึ่งซึ่งอาจจะทำได้เพราะมีระบบคอมพิวเตอร์และโทรมาตรพร้อมอยู่แล้ว แต่ขณะนี้ยังเน้นหนักการพัฒนาด้านการควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์อยู่

เท่าที่ปรากฏในเอกสารที่พิมพ์เผยแพร่แล้วจะเกี่ยวกับกันใช้จุดวัดจุดต่าง ๆ กันทดสอบกับวิธีการคำนวณแบบต่าง ๆ และการนำไปใช้งาน การวิจัยส่วนใหญ่แล้วจะกำกวมระบบกำลังไฟฟ้าที่มีขายง่าย ๆ และในปัจจุบันมุ่งไปทางเพิ่มประสิทธิภาพของตัวประมาณการและการนำมันประยุกต์ใช้ขึ้นสูงขึ้นไป.

15. เอกสารอ้างอิง

1. F.C. Schweppe, J. Wildes, and D. Rom, "Power system static-state estimation", Part I, II, and III, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, pp. 120-135, Jan. 1970
2. R.E. Larson, W.F. Tinner, J. Peschon, L.P. Hajdu, and D.S. Piercy, "State estimation in power systems", part I, and II, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, pp. 345-363, Mar. 1970.
3. J.F. Dopazo, O.A. Klitin, G.W. Stagg, and L.S. VanSlyck, "State Calculation of power systems from line flow measurements" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, pp. 1698-1708, Sept/Oct. 1970.
4. E. Handschin, "Real-time data processing using state estimation in electric power systems", in Real-time Control of Electrical Power Systems. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1972.
5. J.A. Bubenko, and L.O. Petersson, "State estimation in electric power systems using filtering techniques", in Proc. 4th PSCC 1972 Paper 3.3/6.
6. J.F. Dopazo, O.A. Klitin, and A.M. Sasson, "State estimation for power systems: detection and identification of gross measurement errors", in Proc. 8th PICA Conf. 1973, pp. 313-318.
7. S.L. Johnson, "An algorithm for state estimation in power systems", in Proc. 8th PICA Conf. 1973, pp. 319-326.
8. G.H. Couch, A.C. Sullivan, and J.A. Dembecki, "A state estimator oriented to a semi-isolated 5 Gw power system", in IEEE PES summer meeting, 1974, paper 74 346-3.
9. F.C. Schweppe, and E.J. Handschin. "Static state estimation in electric power systems", Proc IEEE, Vol-62, pp. 972-982, July, 1974.
10. E.J. Handschin, F.C. Schweppe, J. Kohlas, and A. Fiechter, "Bad data analysis for power system state estimation" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-94, pp. 329-336, Mar./Apr. 1975.

11. J.H. Harris, G.H. Kellie, J.N. Prewett, and P. Jervis, "Two implementations of state estimator for power systems", in CIGRE 1976. Paper 32-06.
12. F. Ariatti, "System Telemetry and estimation of state variables review of practices and proposals", in CIGRE 1976. Paper 32-14.
13. S.A. Arafah, and R. Schinzinger, "Estimation algorithms for large-scale power systems", in IEEE PES winter meeting. 1977, paper A77 145-6.
14. K. Phua, and J.S. Dillon, "Optimal choice of measurements for state estimation", in Proc. 10th PICA Conf. 1977, pp. 431-441.
15. K. Kannasutra, "Real time computerized control of power system" เอกสารแจกในการบรรยายทางวิชาการครั้งที่ 1/2523 ของ IEEE Thailand Section.