



บทที่ 4

การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังให้น้อยที่สุด โดยการควบคุมการไหลของกำลังจริงด้วยตัวเลื่อนเฟส

4.1 บทนำ

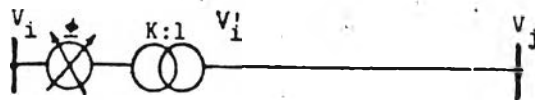
การที่ตัวเลื่อนเฟสสามารถควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่งได้นั้น ส่งผลให้ตัวเลื่อนเฟสกลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานในด้านต่างๆมากมายในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ใช้ในการป้องกันและขจัดปัญหาการ over load ในสายส่ง การเพิ่มขีดจำกัดในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และหัวข้อที่น่าสนใจอีกข้อของการใช้งานตัวเลื่อนเฟสก็คือ การที่ใช้ตัวเลื่อนเฟสมาช่วยในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีการใช้เทคนิคการคำนวณแบบโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear Programming) เข้ามาช่วยในการหาคำตอบของตัวแปรที่ต้องการเพื่อจุดประสงค์คือการทำให้อำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าต่ำที่สุด ตัวแปรที่กล่าวถึงนี้ก็คือ มุมของตัวเลื่อนเฟส (ϕ) ที่จะทำให้กำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าต่ำที่สุด การที่จะหาค่ามุมดังกล่าวนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ตัวแปรอีกชุดหนึ่งมาประกอบในการคำนวณด้วยเราเรียกตัวแปรชุดนี้ว่า ค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟส (Phase Shifter Distribution Factor, FSDFs)

ในบทนี้จะกล่าวถึงค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสและการหาค่าของมุม รวมทั้งการนำค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสนี้ไปใช้ในการคำนวณหามุมที่เหมาะสมที่สุดของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวที่ติดตั้งอยู่ในระบบไม่ว่าจะมีลักษณะการติดตั้งเป็นแบบใดเพื่อที่จะทำให้อำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุด เราจะใช้เทคนิคการคำนวณแบบโปรแกรมไม่เชิงเส้นมาคำนวณหามุมของตัวเลื่อนเฟส (ϕ) ที่เหมาะสม รวมทั้งจะแสดงตัวอย่างของระบบที่มีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสในลักษณะหนึ่งโดยมีมุมของตัวเลื่อนเฟสทุกตัว เป็นมุมที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังสูญเสียมีค่าลดลงต่ำที่สุด

4.2 การคำนวณค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟส [6, 7]

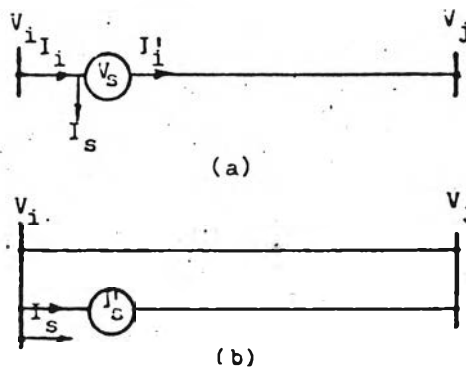
แบบจำลองที่ใช้แสดงผลของตัวเลื่อนเฟสนั้นมีการใช้กันหลายแบบแล้ว

แต่ความเหมาะสมของการใช้งาน ดังในบทที่ 3 เราใช้แบบจำลองของของตัว
 เลื่อนเฟสแบบหนึ่งเพื่อแสดงและรวมผลของตัวเลื่อนเฟสเข้าไปในการคำนวณ
 โหลดโฟลว์ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้งานได้สะดวกและปรับปรุงไปใช้
 กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ง่าย แต่สำหรับการคำนวณหาค่าปัจจัยการกระจาย
 ตัวเลื่อนเฟสรวมทั้งการคำนวณหามุมของตัวเลื่อนเฟสที่เหมาะสมนั้นเราจะใช้แบบ
 จำลองอีกแบบหนึ่ง แต่ไม่ว่าเราจะใช้แบบจำลองแบบใดในการแทนตัวเลื่อนเฟส
 ก็จะให้ผลที่เหมือนกันและมีความสัมพันธ์ต่อกันทั้งสิ้น[7] เมื่อเราติดตั้งตัวเลื่อน
 เฟสในสายส่งระหว่างบัส i และบัส j เราจะได้วงจรสมมูล (Equivalent
 Circuit) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของตัวเลื่อนเฟส

เมื่อเราแทนวงจรสมมูลของตัวเลื่อนเฟสในรูปที่ 4.1 นี้ด้วยแบบ
 จำลองที่ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแรงดัน V_s (Voltage Source) ซึ่งต่อ
 อนุกรมกับสายส่ง และกระแสแทป I_s (Tapped Current) เพื่อแทนตัวเลื่อน
 เฟสแล้ว เราจะได้รูปจำลองของตัวเลื่อนเฟสดังรูปที่ 4.2 โดยรูป(a)อยู่ในรูป
 แหล่งกำเนิดแรงดันและรูป(b)อยู่ในรูปแหล่งกำเนิดกระแส(Current Source)



รูปที่ 4.2 แบบจำลองทางไฟฟ้าของตัวเลื่อนเฟส

โดย
$$I_s = V_s / Z_{i,j} \tag{4.1}$$

เมื่อ $Z_{i,j}$ คืออิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส $i-j$

$$\text{ที่บัส } i \quad I_{i, \dots} = - (I_{i, \dots} + I_{i, \dots}') \quad (4.2)$$

$$\text{ที่บัส } j \quad I_{j, \dots} = I_{j, \dots}' \quad (4.3)$$

เมื่อ $I_{i, \dots}$ คือกระแสฉีดสมมูล (Equivalent Injected Current) ที่บัส i เนื่องจากตัวเลื่อนเฟส

$I_{j, \dots}$ คือกระแสฉีดสมมูล (Equivalent Injected Current) ที่บัส j เนื่องจากตัวเลื่อนเฟส

และเนื่องจากกระแส $I_{i, \dots}$ และ $I_{j, \dots}$ นี้เองทำให้เกิดกำลังที่เราเรียกว่ากำลังฉีดสมมูล (Equivalent Injected Power) ขึ้นที่บัสทั้ง 2 ด้าน

$$\text{โดย} \quad S_{i, \dots} = V_i I_{i, \dots} \quad (4.4)$$

$$\text{และ} \quad S_{j, \dots} = V_j I_{j, \dots} \quad (4.5)$$

ตั้งที่ทราบกันว่าในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นแรงดันไฟฟ้าจะเป็นแบบแรงสูง และมุมของแรงดันที่บัสมีค่าไม่มากนัก เราจะถือว่า $G \ll B$ และ $\delta_i - \delta_j$ มีค่าน้อย ดังนั้นจากสมการ (4.4) และ (4.5) เมื่อมองเข้าทางปลายบัสจะได้

$$S_{i, \dots} = P_{i, \dots} = V_i V_j B_{i, j} \sin \phi_{i, j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4.6)$$

$$S_{j, \dots} = P_{j, \dots} = -V_i V_j B_{i, j} \sin \phi_{i, j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4.7)$$

เมื่อ V_i, V_j คือแรงดันที่บัส i และ j ตามลำดับ

$B_{i, j}$ คือส่วนกลับของรีแอกแตนซ์ ($x_{i, j}$) ของสายส่งระหว่างบัส $i-j$

$\phi_{i, j}$ คือมุมของตัวเลื่อนเฟสที่ติดตั้งในสายส่งระหว่างบัส $i-j$

δ_i, δ_j คือมุมของแรงดันที่บัส i และ j ตามลำดับ

รายละเอียดของการคำนวณพิจารณาได้จากภาคผนวก ก.

ในการหาค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสนี้เรากำหนดให้แรงดันที่บัสทุกบัสมีค่าเท่ากับ 1 และถือว่า $\delta_i - \delta_j$ มีค่าน้อยรวมทั้งมุม ϕ ก็เป็นมุมที่มีค่าน้อย ดังนั้น $\sin \phi = \phi$ และ $\cos(\delta_i - \delta_j) = 1$ ดังนั้นจากสมการ (4.4) ถึง (4.7) จะได้ว่า

$$S_{i, \dots} = -\phi_{i, j} / x_{i, j} \quad (4.8)$$

$$S_{j, \dots} = \phi_{i, j} / x_{i, j} \quad (4.9)$$

ซึ่งเมื่อระบบไม่มีภาวะขัดข้อง (No outage) เราจะสามารถใช้ค่ารีแอกแตนซ์เมทริกซ์ (Reactance Matrix) ของระบบมาหาค่าการเปลี่ยนแปลงของการไหลของกำลังจริงในสายส่ง p-q เนื่องจากการปรับมุมไปหนึ่งหน่วยของตัวเลื่อนเฟสในสายส่ง i-j ได้ ซึ่งนั่นคือความหมายของค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟส โดยรีแอกแตนซ์เมทริกซ์เราจะสร้างได้โดยใช้วิธีเดียวกับการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Z_{bus}) ซึ่งเราจะใช้วิธี add branch add link โดยใช้สมการต่างๆ ดังนี้ [12]

เมื่อ p ไม่เป็น reference bus และ p-q เป็น branch

$$\begin{aligned} Z_{q,i} &= Z_{p,i} ; i = 1, 2, \dots, m \\ & i \neq q \\ Z_{q,q} &= Z_{p,q} + z_{p,q,pq} \end{aligned} \quad (4.10)$$

เมื่อ p เป็น reference bus และ p-q เป็น branch

$$\begin{aligned} Z_{q,i} &= 0 ; i = 1, 2, \dots, m \\ & i \neq q \\ Z_{q,q} &= z_{p,q,pq} \end{aligned} \quad (4.11)$$

เมื่อ p ไม่เป็น reference bus และ p-q เป็น link

$$\begin{aligned} Z_{1,i} &= Z_{p,i} - Z_{q,i} ; i = 1, 2, \dots, m \\ & i \neq 1 \\ Z_{1,1} &= Z_{p,1} - Z_{q,1} + z_{p,q,pq} \end{aligned} \quad (4.12)$$

เมื่อ p เป็น reference bus และ p-q เป็น link

$$\begin{aligned} Z_{1,i} &= -Z_{q,i} ; i = 1, 2, \dots, m \\ & i \neq 1 \\ Z_{1,1} &= -Z_{q,1} + z_{p,q,pq} \end{aligned} \quad (4.13)$$

แล้วทำการขจัดแถวที่ 1 ออกด้วยสมการ (4.14)

$$\begin{aligned} Z_{i,j}(\text{modified}) &= Z_{i,j}(\text{before elimination}) - Z_{1,i}Z_{1,j}/Z_{1,1} \\ & i, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (4.14)$$

ในการสร้างรีแอกแตนซ์เมทริกซ์เราใช้ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งต่างๆ ในระบบแทนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($z_{p,q,pq}$) ในสมการ (4.10) ถึง (4.14) ส่วนค่า Z ต่างๆ เราเปลี่ยนเป็น X เพื่อความเข้าใจ สามารถศึกษาตัวอย่างในการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ได้จาก [12]

โดยนิยามค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟส (Phase Shifter Distribution Factor, $d_{pq,ij}$) คือ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของการไหลของกำลังจริงในสายส่ง $p-q$ ต่อหนึ่งหน่วยการเปลี่ยนแปลงของมุมของตัวเลื่อนเฟสในสายส่ง $i-j$ ซึ่งค่า $d_{pq,ij}$ สามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$d_{pq,ij} = \Delta P_{pq} / \Delta \phi_{ij} = (S_{1p} X_{1p} + S_{2p} X_{2p} - S_{1q} X_{1q} - S_{2q} X_{2q}) / x_{pq} \Delta \phi_{ij}$$

$$= (-1/x_{ij} x_{pq}) (X_{1p} + X_{2p} - X_{1q} - X_{2q}) \quad (4.15)$$

$$d_{ij,ij} = \Delta P_{ij} / \Delta \phi_{ij} = (S_{1i} X_{1i} + S_{2i} X_{2i} - S_{1j} X_{1j} - S_{2j} X_{2j}) / x_{ij} \Delta \phi_{ij}$$

$$+ (S_{2i} / \Delta \phi_{ij})$$

$$= (1/x_{ij}^2) (x_{ij} - X_{1i} - X_{2j} + 2X_{1j}) \quad (4.16)$$

โดย x_{ij} คือค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งระหว่างบัส $i-j$

X_{pq} คือสมาชิกของรีแอกแตนซ์เมทริกซ์ตำแหน่งที่ (p, q)

สำหรับค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสนี้ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของวงจรหรือเนทเวอร์คเช่น มีการเพิ่มสายส่งเข้ามาใหม่ หรือมีการปลดสายส่งออก ซึ่งไม่ว่าด้วยกรณีใดค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากการที่ระบบมีลักษณะวงจรใหม่จะมีผลทำให้รีแอกแตนซ์เมทริกซ์เดิมเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะวงจรไม่ว่ากรณีใดๆดังกล่าวเบื้องต้น จะต้องทำการคำนวณรีแอกแตนซ์เมทริกซ์และค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสของระบบที่มีลักษณะใหม่ก่อนจะนำไปใช้งานต่อไป

ค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟส (FSDFs) เหล่านี้ จะเป็นตัวแปรที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงและขนาดของการเปลี่ยนแปลงของมุมของตัวเลื่อนเฟส ซึ่งเราจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์นี้เพื่อหามุมที่เหมาะสมที่สุดของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวที่ติดตั้งในลักษณะใดๆก็ตามในระบบซึ่งจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุดดังกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.3 การหามุมของตัวเลื่อนเฟสที่เหมาะสม [6]

ดังที่กล่าวในบทที่ 3 เมื่อตัวเลื่อนเฟสสามารถควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่งได้และขนาดของกำลังสูญเสียในสายส่งก็เกี่ยวข้องกับขนาดปริมาณการไหลของกำลังจริงในสายส่งนั้นๆ ดังนั้นถ้าเราควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่งให้มีขนาดที่เหมาะสมค่าหนึ่งและยังเป็นไปตามภาวะที่ระบบต้องการแล้ว

เราก็จะสามารถทำให้กำลังสูญเสียของระบบที่เป็นผลรวมของกำลังสูญเสียในสายส่งทุกเส้นมีค่าต่ำลงได้ พิจารณาค่ากำลังสูญเสียของระบบที่เป็นผลรวมของกำลังสูญเสียในสายส่งทุกเส้นดังสมการ

$$P_L = \sum_{pq=1}^b I_{pq}^2 * R_{pq} \quad (4.17)$$

$$= \sum_{pq=1}^b (VA_{pq}/V_{pq})^2 * R_{pq} \quad (4.18)$$

$$= \sum_{pq=1}^b [(P_{pq}^2 + Q_{pq}^2)/V_{pq}^2] * R_{pq} \quad (4.19)$$

เมื่อ I_{pq} คือขนาดของกระแสในสายส่ง p-q

VA_{pq} คือขนาดของกำลังปรากฏ(Apparent Power)ในสายส่ง p-q

V_{pq} คือขนาดแรงดันคร่อมสายส่ง p-q

R_{pq} คือความต้านทาน(Resistance)ของสายส่ง p-q

b คือจำนวนของสายส่งทั้งหมด

โดยเริ่มจากขั้นแรกเรากำหนดว่าในระบบมีตัวเลื่อนเฟสติดตั้งอยู่ที่สายส่งระหว่างบัส i และบัส j และให้มุมของตัวเลื่อนเฟสมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบดังสมการ(4.19) ถ้าเรากำหนดโดยถือว่าระบบมีกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟมีคุณสมบัติดีคัปเปิล(Decouple)กันแล้วและทำการปรับมุมของตัวเลื่อนเฟสไปเป็นมุม $\Delta\phi_{ij}$ แล้ว เราจะได้สมการของกำลังสูญเสียในสายส่ง p-q เป็นไปตามสมการ

$$P_{Lpq} = [(P_{pq} + \Delta P_{pq})^2 + (Q_{pq} + \Delta Q_{pq})^2] / (V_{pq} + \Delta V_{pq})^2 * R_{pq} \quad (4.20)$$

โดยถือว่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของมุม ϕ_{ij} ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันที่บัสและกำลังรีแอกทีฟ ดังนั้นแรงดันที่บัสและกำลังรีแอกทีฟจึงถือว่าเป็นตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียของระบบ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงมุม ϕ_{ij} ดังนั้นสมการ(4.20)สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_{Lpq} = (P_{pq} + \Delta P_{pq})^2 * R_{pq} \quad (4.21)$$

ดังนั้นเมื่อคิดรวมกำลังสูญเสียในทุกสายส่ง เราจะได้กำลังสูญเสียของระบบดังสมการ

$$F = P_L = \sum_{pq=1}^b (P_{pq} + \Delta P_{pq})^2 * R_{pq} \quad (4.22)$$

สมการ(4.22)คือฟังก์ชันเป้าหมาย(Objective Function)ที่เราต้องการทำให้มีค่าต่ำที่สุด(Minimization) โดยการหาค่าที่เหมาะสม(Optimal Value)ของตัวแปรควบคุมซึ่งก็คือมุมของตัวเลื่อนเฟส($\phi_{i,j}$) เราสามารถเขียนสมการ(4.22)ใหม่ได้ดังรูป

$$\min_{\Delta \phi_{i,j}} P_L = \min_{\Delta \phi_{i,j}} [\sum_{pq=1}^b (P_{pq} + \Delta P_{pq})^2 * R_{pq}] \quad (4.23)$$

- เมื่อ $p-q$ คือสายส่งในระบบ ; $pq = 1, 2, \dots, b$
 ij คือสายส่งที่มีตัวเลื่อนเฟสติดตั้งอยู่ ; $ij = 1, 2, \dots, m$
 P_{pq} คือขนาดของกำลังจริงที่ไหลในสายส่ง $p-q$ ก่อนมีการปรับค่าของมุมของตัวเลื่อนเฟส หาได้จาก load flow ในภาวะพื้นฐาน(base case)
 ΔP_{pq} คือขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงในสายส่ง $p-q$ เนื่องมาจากการปรับค่าของมุมของตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง $i-j$ หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_{pq} \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \partial P_{pq} / \partial \phi_1 & \dots & \partial P_{pq} / \partial \phi_k \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi_1 \\ \Delta \phi_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \phi_k \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

โดยเมทริกซ์แรกทางขวาของสมการ(4.24)คือ อัตราของการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมตัวเลื่อนเฟสซึ่งก็คือค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟส(FSDFs)นั่นเอง ดังนั้นสมการ(4.24)สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta P_{pq} = \sum_{ij=1}^m (d_{pq,ij} * \Delta \phi_{ij}) \tag{4.25}$$

จากสมการ(4.22) เมื่อเรำดำเนินถึงขีดจำกัด(Limit)ของมุมของตัวเลื่อนเฟสและขนาดกำลังจริงสูงสุดที่ไหลได้ในสายส่งแล้ว ปัญหาการ Minimization จะกลายเป็นปัญหาแบบที่เรียกว่าปัญหาโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear Programming) ซึ่งมีเงื่อนไขบังคับ(Constrains)เป็นแบบ Linear inequality constrains โดยฟังก์ชันเป้าหมายในสมการ(4.22) เขียนได้ดังนี้

$$F = \sum_{pq=1}^b (P_{pq} + \Delta P_{pq})^2 * R_{pq} + \sum_I A_I (P_I + \Delta P_I - P_{I,max})^2 \tag{4.26}$$

เงื่อนไขบังคับคือ

$$P_{pq} + \Delta P_{pq} \leq P_{pq,max}$$

$$\Delta \phi_{ij,min} \leq \phi_{ij} \leq \Delta \phi_{ij,max}$$

เมื่อ A คือ Penalty Factor เมื่อมีการไหลของกำลังจริงในสายส่งเกินขีดจำกัดและ A = 0 เมื่อการไหลของกำลังจริงไม่เกินขีดจำกัด

I คือสายส่งที่มีการไหลของกำลังจริงเกินขีดจำกัด

เมื่อทำการ Optimization สมการ(4.26) เพื่อให้ได้ภาวะที่ต้องการคือค่ากำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุด เราจะได้ว่า ณ จุดที่ กำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุดจะมีความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆตามสมการ

$$\sum_{ij=1}^m (\sum_{pq=1}^b R_{pq} d_{pq,ij} + \sum_I A_I d_{I,ij}) \Delta \phi_{ij}$$

$$ij \neq t = -\sum_{pq=1}^b P_{pq} R_{pq} d_{pq,t} - \sum_I A_I (P_I - \Delta P_{I,max}) d_{I,t}$$

$$s = 1, 2, \dots, m \tag{4.27}$$

s ≠ t ; t คือตัวเลื่อนเฟสที่มีมุมเกินขีดจำกัด

เมื่อเราทำการแก้สมการ (4.27) เราจะได้มุมของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวที่มีค่าเหมาะสม (Optimal Value) สำหรับการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสในลักษณะนั้นๆ จะทำให้ระบบมีค่ากำลังสูญเสียของระบบต่ำที่สุด ในสมการ (4.27) นี้จะรวมถึงผลของขีดจำกัด 2 ชนิดคือ ขีดจำกัดของสายส่งและขีดจำกัดของมุมของตัวเลื่อนเฟส

ความจริงในทางปฏิบัติในตัวเลื่อนเฟสจะมีขีดจำกัดทางความสามารถในการปรับขนาดของมุมโดยสามารถปรับขนาดของมุม ϕ เป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุดที่ค่าจำกัดค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงนัก รวมทั้งสายส่งก็มีขีดจำกัดในการส่งพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ค่าหนึ่งเท่านั้นเช่นกัน แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราทำการศึกษาเพื่อพิจารณาผลในเชิงทฤษฎีจึงกำหนดให้ละขีดจำกัดทั้ง 2 ชนิดนี้โดยคิดว่าสายส่งทุกเส้นสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าในขนาดมากๆ ได้โดยไม่มีค่าจำกัดไว้ ตัวเลื่อนเฟสก็สามารถกำหนดให้มีค่าของมุมมากขึ้นเท่าใดก็ได้ การที่เราละขีดจำกัดทั้ง 2 ชนิดนี้ก็เพื่อจุดประสงค์ในการศึกษาถึงภาวะขีดสูงสุดที่กำลังสูญเสียของระบบจะลดลงไปได้ เพราะถ้าเราคำนึงถึงขีดจำกัดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ขีดจำกัดทั้ง 2 แบบจะมีผลต่อขนาดการลดลงของกำลังสูญเสียของระบบหรือกลายเป็นตัวแปรอีกชนิดหนึ่ง โดยขัดขวางการลดลงอย่างอิสระของกำลังสูญเสีย ทำให้การศึกษานี้ไม่สามารถได้ผลโดยตรงของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียที่ลดลงกับตัวเลื่อนเฟสทุกตัวที่มีการกำหนดมุมที่เหมาะสมไว้ รวมทั้งทำให้การวิเคราะห์ผลของหัวข้อที่ต้องการศึกษาทำได้ไม่ชัดเจน ซึ่งขอบเขตของการศึกษานี้ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 ดังนั้นเมื่อละขีดจำกัดทั้ง 2 แบบดังกล่าวแล้วสมการ (4.27) จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\sum_{i,j=1}^m \sum_{p,q=1}^b (R_{pq} d_{p-q,i,j}) \Delta\phi_{i,j} = -\sum_{p,q=1}^b P_{pq} R_{pq} d_{p-q} \quad (4.28)$$

$$s = 1, 2, \dots, m$$

- เมื่อ m คือจำนวนของตัวเลื่อนเฟส
- i, j คือสายส่งที่มีตัวเลื่อนเฟสติดตั้งอยู่
- b คือจำนวนสายส่งทั้งหมด
- p, q คือสายส่งใดๆในระบบ
- R_{pq} คือความต้านทานของสายส่ง $p-q$
- $d_{p-q,i,j}$ คือค่า FSDF ของสายส่ง $p-q$ เนื่องจากตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง $i-j$
- $\Delta\phi_{i,j}$ คือมุมที่เหมาะสมของตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง $i-j$

P_{pq} คือขนาดของกำลังจริงที่ไหลในสายส่ง p-q หาได้จาก
 โหลดโพลาร์กรณีพื้นฐาน(base case load flow)
 สมการ(4.28)สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

A มีมิติ $m \times m$

$\phi_{1,j}$ มีมิติ $m \times 1$

B มีมิติ $m \times 1$

b

$$\text{โดย } \begin{matrix} A_{1,1} = \sum_{pq=1} R_{pq} d_{pq,1} d_{pq,1} \\ \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad b \quad \cdot \quad \cdot \\ A_{1,m} = \sum_{pq=1} R_{pq} d_{pq,1} d_{pq,m} \end{matrix}$$

b

$$\begin{matrix} A_{m,1} = \sum_{pq=1} R_{pq} d_{pq,m} d_{pq,1} \\ \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad b \quad \cdot \quad \cdot \\ A_{m,m} = \sum_{pq=1} R_{pq} d_{pq,m} d_{pq,m} \end{matrix}$$

pq=1

b

$$\text{และ } \begin{matrix} B_1 = -\sum_{pq=1} P_{pq} R_{pq} d_{pq,1} \\ \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad b \quad \cdot \quad \cdot \\ B_m = -\sum_{pq=1} P_{pq} R_{pq} d_{pq,m} \end{matrix}$$

pq=1

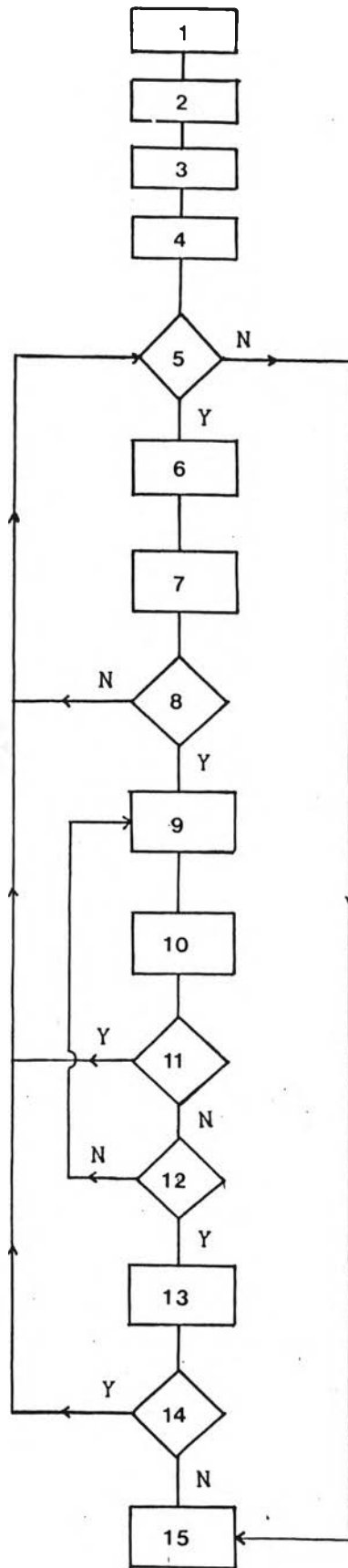
เมื่อเราแก้สมการ (4.29) เราจะได้ค่ามุมที่เหมาะสมของตัวเลื่อนเฟส ทุกตัวที่มีการติดตั้งอยู่ระบบที่จะทำให้ระบบมีกำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุด การแก้สมการดังกล่าวในทางปฏิบัติมีหลายวิธีแต่ในที่นี้จะเลือกใช้วิธีการอินเวอร์ทเมทริกซ์ [14] โดยเมื่อเราคำนวณค่าของสมาชิกทุกตัวของเมทริกซ์ A และ B แล้ว เราจะทำการอินเวอร์ทเมทริกซ์ A แล้วนำมาคูณกับเมทริกซ์ B ด้วยวิธีการทางเมทริกซ์ดังสมการ (4.30) จะทำให้เราได้คำตอบคือเมทริกซ์ ϕ ตามต้องการ

$$\begin{bmatrix} \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

4.4 อัลกอริทึมของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบด้วยตัวเลื่อนเฟส

อัลกอริทึมของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบให้มีค่าต่ำที่สุดโดยการควบคุมการไหลของกำลังจริงผ่านทางมุมที่เหมาะสม (Optimal Value) ของตัวเลื่อนเฟสแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

1. อ่านข้อมูลของระบบที่กำลังทำการศึกษาเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณโหลดโพลาร์ ข้อมูลเหล่านี้ก็เช่น จำนวนบัสและสายส่ง ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง กำลังการผลิต โหลด จำนวน iteration สูงสุด ค่า error setting ฯลฯ พร้อมทั้งนิมฟ์ข้อมูลของระบบออกทางจอภาพเพื่อตรวจสอบ
2. ทำการคำนวณโหลดโพลาร์ตามวิธีของนิวตัน-ราฟสันในบทที่ 2 พร้อมทั้งคำนวณค่า line flow และค่าต่างๆที่ต้องการเช่น กำลังสูญเสียของระบบ แล้วบันทึกผลพร้อมทั้งนิมฟ์ผลออกทางจอภาพเพื่อใช้ในการพิจารณาและศึกษาเปรียบเทียบ
3. ย้ายค่าของกำลังจริงที่ไหลในสายส่งไปเก็บไว้ในตัวแปรอีกชุดหนึ่งเพื่อใช้ในการคำนวณมุม ϕ ตามสมการ (4.28)
4. คำนวณค่ารีแอดแตนซ์เมทริกซ์ของระบบตามสมการ (4.10) ถึง (4.14) แล้วทำการคำนวณค่าปัจจัยการกระจายตัวเลื่อนเฟสทุกค่าของระบบตามสมการ (4.15) และ (4.16)
5. พิจารณาว่าต้องการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสเข้าไปในระบบที่กำลังทำการศึกษาอยู่หรือไม่ ถ้าต้องการทำขั้นตอนที่ 6 ถ้าไม่ต้องการข้ามไปทำขั้นตอนที่ 15



รูปที่ 4.3 อัลกอริทึมของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบด้วยตัวเลื่อนเฟส

6. ใส่ข้อมูลของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวที่จะติดตั้ง เข้าไปในระบบซึ่งประกอบด้วย จำนวนตัวเลื่อนเฟสและตำแหน่งของตัวเลื่อนเฟส โดยข้อมูลดังกล่าวนี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการติดตั้งของตัวเลื่อนเฟสในระบบ
7. คำนวณค่ามุมที่เหมาะสม (Optimal Value) ของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวตามสมการ (4.28) ถึง (4.30)
8. พิจารณาว่าสามารถหามุมที่เหมาะสมของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวได้หรือไม่ ถ้าหาได้ทำขั้นตอนที่ 9 ถ้าหาไม่ได้กลับไปทำขั้นตอนที่ 5
9. ทำการปรับค่าสมาชิกของแอดมิตแตนซ์ (Y_{bus}) โดยรวมผลของตัวเลื่อนเฟส เข้าไปในระบบตามสมการ (3.1) ถึง (3.3)
10. ทำการคำนวณโพลดิโพลว์ 1 iteration เพื่อหาค่าขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆใหม่ ซึ่งค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปในทุกๆ iteration ของการคำนวณโพลดิโพลว์จนกว่าการคำนวณจะ converge ก็จะได้ค่าต่างๆเป็นคำตอบที่เหมาะสม
11. ตรวจสอบจำนวน iteration ต่อไปว่าเกินค่า iteration สูงสุดที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าเกินให้แจ้งว่าการคำนวณไม่ converge ในจำนวน iteration สูงสุดที่กำหนดไว้แล้วกลับไปขั้นตอนที่ 5 ถ้าไม่เกินทำขั้นตอนที่ 12 ต่อไป
12. ตรวจสอบว่าการคำนวณโพลดิโพลว์ converge หรือยัง โดยพิจารณาจากค่า max.error ที่ได้จากการคำนวณว่าน้อยหรือมากกว่าค่า error setting ที่กำหนดไว้ ถ้ามากกว่าแสดงว่ายังไม่ converge กลับไปทำขั้นตอนที่ 9 โดยใช้ขนาดและมุมของแรงดันที่ได้มาใหม่ไปปรับค่าแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ (Y_{bus}) ใหม่ ถ้าน้อยกว่าแสดงว่าการคำนวณ converge แล้วทำขั้นตอนที่ 13 ต่อไป
13. คำนวณ line flow และค่าต่างๆที่ต้องการ พร้อมทั้งบันทึกผลลงใน file และพิมพ์ผลออกทางจอภาพ
14. พิจารณาว่าต้องการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสในลักษณะแบบอื่นอีกหรือไม่ ถ้าต้องการกลับไปทำขั้นตอนที่ 5 ถ้าไม่ต้องการไปทำขั้นตอนที่ 15
15. หยุดโปรแกรม

4.5 ผลของมุมที่เหมาะสมของตัวเลื่อนเฟสต่อกำลังสูญเสียของระบบ

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่าง 6 ชุดที่แสดงถึงผลของมุมที่เหมาะสมของตัวเลื่อนเฟสที่คำนวณได้ด้วยแนววิธีดังกล่าวมา เบื้องต้นซึ่งทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุด สำหรับลักษณะการติดตั้งนั้นเราติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่ง

ระหว่างบัส 2-3 และบัส 2-5 โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่ามุมตั้งกล่าวนี้มีค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้กำลังสูญเสียมีค่าต่ำที่สุด และถ้ามุมของตัวเลื่อนเฟสทั้ง 2 ตัวเลื่อนไปจากค่าที่เหมาะสมนี้ในลักษณะต่าง ๆ กัน 4 แบบก็จะทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าสูงขึ้นกว่าค่าที่ได้จากมุมที่เหมาะสม หรืออาจจะทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณีภาวะพื้นฐาน (base case) ที่ไม่มีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส ระบบที่ใช้เป็นระบบทดสอบมีข้อมูลของระบบแสดงไว้ในบทที่ 3

4.5.1 กรณีที่ 1

การคำนวณโหลดโพลาร์ของระบบทดสอบในภาวะพื้นฐาน (base case) ไม่มีตัวเลื่อนเฟสติดตั้งอยู่หรือมีการติดตั้งที่สายส่งระหว่างบัส 2-3 และบัส 2-5 แต่มุมของตัวเลื่อนเฟสทั้ง 2 มีค่าเป็น 0

$$\phi_{23} = 0.00 \text{ deg.}$$

$$\phi_{25} = 0.00 \text{ deg.}$$

ผลลัพธ์

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus no.	bus type	pu	kv	deg.	generation MW	MVAR	load MW	MVAR
1	3	1.060	243.80	.00	132.22	99.83	.00	.00
2	2	1.000	230.00	-2.09	40.00	-40.57	20.00	10.00
3	1	.980	225.39	-4.58	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.976	224.57	-4.90	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.952	218.96	-5.83	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line no.	from bus p	to bus q	flow from bus p MW	flow from bus p MVAR	flow to bus q MW	flow to bus q MVAR	line loss MW	line loss MVAR	line charging MVAR
1	1	2	90.12	77.13	-87.62	-69.62	2.50	7.51	.00
2	1	3	42.09	22.70	-40.46	-17.82	1.53	4.89	.00
3	2	3	24.75	3.40	-24.37	-2.28	.37	1.12	.00
4	2	4	27.80	10.68	-27.62	-9.09	.18	1.60	.00
5	2	5	55.08	4.97	-52.63	-1.30	2.45	3.67	.00
6	3	4	19.84	5.08	-19.79	-4.96	.04	.13	.00
7	4	5	7.41	9.05	-7.37	-8.70	.04	.34	.00

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	172.22	59.26
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	7.2182	19.2641
mismatch	.0003	.0007
*** POWER LOSS IN BASE CASE =	7.2182 MW	***

4.5.2 กรณีที่ 2

การคำนวณโหลดโพลาร์เมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส 2-3 และ 2-5 โดยมีมุมของตัวเลื่อนเฟสเป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณ

$$\phi_{23} = -1.748 \text{ deg.}$$

$$\phi_{25} = -6.318 \text{ deg.}$$

ผลลัพธ์

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus no.	bus type	pu	kv.	deg.	generation MW	MVAR	load MW	MVAR
1	3	1.050	243.80	.00	131.39	100.50	.00	.00
2	2	1.000	230.00	-1.77	40.00	-39.34	20.00	10.00
3	1	.980	225.42	-5.73	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.977	224.66	-6.16	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.962	221.18	-10.07	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line no.	from bus p	to bus q	flow from bus p MW	MVAR	flow to bus q MW	MVAR	line loss MW	MVAR	line loss MVAR
1	1	2	81.28	79.75	-78.97	-72.83	2.31	6.92	.00
2	1	3	50.11	20.74	-48.02	-14.46	2.09	6.28	.00
3	2	3	22.29	4.03	-21.98	-3.11	.31	.92	.00
4	2	4	42.59	9.75	-42.21	-6.31	.38	3.44	.00
5	2	5	34.10	9.71	-33.09	-8.20	1.01	1.51	.00
6	3	4	25.00	2.57	-24.93	-2.37	.07	.20	.00
7	4	5	27.14	3.68	-26.91	-1.80	.24	1.89	.00

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	171.39	51.16
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	6.3992	21.1602
mismatch	.0058	.0022

we put pst. at line No. = 2 angle(deg.) = -1.74800

we put pst. at line No. = 5 angle(deg.) = -6.21800

*** POWER LOSS IS = 6.3992 MW ***

4.5.3 กรณีที่ 3

การคำนวณโหลดโพลาร์เมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส 2-3 และ 2-5 โดยมีมุมของตัวเลื่อนเฟส ϕ_{23} เลื่อนออกจากค่าที่เหมาะสม +10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนมุม ϕ_{25} เป็นค่าเหมาะสมที่ได้จากการคำนวณ

$$\phi_{23} = -1.900 \text{ deg.}$$

$$\phi_{25} = -6.318 \text{ deg.}$$

ผลลัพธ์

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

no.	type	bus voltage			generation		load	
		pu	kv	deg.	MW	MVAR	MW	MVAR
1	3	1.060	243.80	.00	121.40	100.50	.00	.00
2	2	1.000	230.00	-1.76	40.00	-39.33	20.00	10.00
3	1	.980	225.43	-5.77	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.977	224.68	-6.19	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.962	221.17	-10.08	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line no.	from bus p	to bus q	flow from bus p		flow to bus q		line loss		line charg.
			MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	
1	1	2	80.99	79.84	-78.68	-72.92	2.30	6.91	.00
2	1	3	50.41	20.66	-48.30	-14.32	2.11	6.34	.00
3	2	3	21.43	4.26	-21.14	-3.40	.29	.86	.00
4	2	4	42.99	9.71	-42.60	-6.21	.39	3.50	.00
5	2	5	34.27	9.65	-33.26	-8.12	1.01	1.52	.00
6	3	4	24.44	2.72	-24.37	-2.53	.06	.19	.00
7	4	5	26.97	3.74	-26.74	-1.87	.23	1.86	.00

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	171.40	61.17
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	6.4002	21.1751
mismatch	.0051	.0019

we put pst. at line No.= 3 angle(deg.) = -1.90000
we put pst. at line No.= 5 angle(deg.) = -6.21800
** POWER LOSS IS = 6.4002 MW **

4.5.4 กรณีที่ 4

การคำนวณโหลดโพลาร์เมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส 2-3 และ 2-5 โดยมีมุมของตัวเลื่อนเฟส ϕ_{23} เลื่อนออกจากค่าที่เหมาะสม -10 เกร็ด เซนต์ ส่วนมุม ϕ_{25} เป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณ

$$\phi_{23} = -1.748 \text{ deg.}$$

$$\phi_{25} = -5.700 \text{ deg.}$$

ผลลัพธ์

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus no.	bus type	bus voltage			generation*		load	
		pu	kv	deg.	MW	MVAR	MW	MVAR
1	3	1.060	243.80	.00	131.42	100.42	.00	.00
2	2	1.000	230.00	-1.79	40.00	-39.64	20.00	10.00
3	1	.980	225.44	-5.66	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.977	224.68	-6.07	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.961	220.97	-9.66	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line no.	from bus p	to bus q	flow from bus p		flow to bus q		line loss		line charg.
			MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	
1	1	2	61.77	79.61	-79.45	-72.65	2.32	6.95	.00
2	1	3	49.64	20.81	-47.58	-14.62	2.06	6.19	.00
3	2	3	21.55	4.19	-21.26	-2.32	.29	.87	.00
4	2	4	41.59	9.73	-41.22	-6.45	.36	3.28	.00
5	2	5	26.32	9.08	-25.20	-7.40	1.12	1.68	.00
6	3	4	23.84	2.95	-23.78	-2.77	.06	.18	.00
7	4	5	25.00	4.22	-24.80	-2.60	.20	1.62	.00

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	171.42	60.77
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	6.4187	20.7728
mismatch	.0021	.0014

we put pst. at line No.= 2 angle(deg.) = -1.74800
we put pst. at line No.= 5 angle(deg.) = -5.70000
** POWER LOSS IS = 6.4187 MW **

4.5.5 กรณีที่ 5

การคำนวณโหลดโพลาร์เมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส 2-3 และ 2-5 โดยมีมุมของตัวเลื่อนเฟสทั้ง 2 ตัวเลื่อนออกจากค่าที่เหมาะสม +10 และ -10 เองรีเซนต์ตามลำดับ

$$\phi_{23} = -1.900 \text{ deg.}$$

$$\phi_{25} = -5.700 \text{ deg.}$$

ผลลัพธ์

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus no.	bus type	bus voltage			generation		load	
		pu	kv	deg.	MW	MVAR	MW	MVAR
1	3	1.060	243.80	.00	131.42	100.42	.00	.00
2	2	1.000	230.00	-1.78	40.00	-39.63	20.00	10.00
3	1	.980	225.46	-5.70	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.977	224.70	-6.10	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.961	220.96	-9.67	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line no.	from bus p	to bus q	flow from bus p		flow to bus q		line loss		line cherg.
			MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	
1	1	2	81.48	79.69	-79.17	-72.76	2.31	6.94	.00
2	1	3	49.94	20.73	-47.86	-14.48	2.08	6.24	.00
3	2	3	20.69	4.42	-20.42	-3.62	.27	.81	.00
4	2	4	41.98	9.69	-41.61	-6.35	.37	3.34	.00
5	2	5	36.50	9.02	-35.37	-7.32	1.13	1.70	.00
6	3	4	23.28	3.10	-23.22	-2.92	.06	.17	.00
7	4	5	24.83	4.27	-24.63	-2.68	.20	1.60	.00

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	171.42	60.79
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	6.4211	20.7926
mismatch	.0025	.0019

we put pst. at line No. = 3 angle(deg.) = -1.90000
we put pst. at line No. = 5 angle(deg.) = -5.70000
** POWER LOSS IS = 6.4211 MW **

4.5.6 กรณีที่ 6

การคำนวณโหลดโพลาร์เมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส 2-3 และ 2-5 โดยมีมุมของตัวเลื่อนเฟสทั้ง 2 เป็นค่าใดๆที่ไม่ได้คำนวณหาอย่างเหมาะสม ในกรณีนี้กำหนดให้

$$\phi_{23} = -2.000 \text{ deg.}$$

$$\phi_{25} = 2.000 \text{ deg.}$$

ผลลัพธ์

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus no.	bus type	bus voltage			generation		load	
		pu	kv	deg.	MW	MVAR	MW	MVAR
1	3	1.0601	243.801	.001	132.991	99.611	.001	.001
2	2	1.0001	230.001	-2.031	40.001	-39.311	20.001	10.001
3	1	.9801	225.461	-4.941	.001	.001	45.001	15.001
4	1	.9771	224.641	-5.051	.001	.001	40.001	5.001
5	1	.9471	217.841	-4.591	.001	.001	60.001	10.001

*** LINE FLOW ***

line no.	from bus p	to bus q	flow from bus p		flow to bus q		line loss		line cherg.
			KW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	
1	1	2	68.371	77.651	-85.901	-70.251	2.461	7.391	.001
2	1	3	44.621	21.961	-42.861	-16.671	1.761	5.281	.001
3	2	3	11.141	7.331	-11.031	-7.011	.111	.321	.001
4	2	4	29.771	10.391	-29.571	-8.601	.201	1.791	.001
5	2	5	54.991	3.231	-61.601	1.851	3.391	1.381	.001
6	3	4	8.891	8.681	-8.871	-8.631	.021	.051	.001
7	4	5	-1.551	12.231	1.601	-11.851	.051	.381	.001

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	172.99	60.29
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	7.9805	16.5914
mismatch	.0049	3.7032

we put pst. at line No.= 3 angle(deg.) = -2.00000
we put pst. at line No.= 5 angle(deg.) = 2.00000
** POWER LOSS IS = 7.9805 MW **

4.6 วิเคราะห์ผล

ผลของการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส 2-3 และ 2-5 ด้วยค่ามุมของตัวเลื่อนเฟสต่างๆกัน 6 แบบ สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.1

กรณีที่	มุมของตัวเลื่อนเฟส (ϕ_{ij}) (deg.)	กำลังสูญเสียของระบบ (MW)	หมายเหตุ
1	$\phi_{23} = 0.0$ $\phi_{25} = 0.0$	7.2182	ไม่มีตัวเลื่อนเฟส
2	$\phi_{23} = -1.748$ $\phi_{25} = -6.318$	6.3993	มุมที่เหมาะสมจากการคำนวณ
3	$\phi_{23} = -1.900$ $\phi_{25} = -6.318$	6.4002	$\phi_{23} + 10$ เปอร์เซ็นต์
4	$\phi_{23} = -1.748$ $\phi_{25} = -5.700$	6.4187	$\phi_{25} - 10$ เปอร์เซ็นต์
5	$\phi_{23} = -1.900$ $\phi_{25} = -5.700$	6.4211	$\phi_{23} + 10$ เปอร์เซ็นต์ $\phi_{25} - 10$ เปอร์เซ็นต์
6	$\phi_{23} = -2.000$ $\phi_{25} = 2.000$	7.9805	ϕ_{23} ค่าใดๆ ϕ_{25} ค่าใดๆ

ตารางที่ 4.1 ผลของมุมของตัวเลื่อนเฟสกับกำลังสูญเสียของระบบ

ในกรณีที่ 1 เรากำหนดมุมของตัวเลื่อนเฟสให้เป็น 0.00 ทั้ง 2 ตัว หรือกล่าวว่ามีตัวเลื่อนเฟสในระบบ กำลังสูญเสียที่ได้จะเป็นกำลังสูญเสียของระบบที่ยังไม่ได้มีการควบคุมการไหลของกำลังจริงเพื่อลดกำลังสูญเสียลงมา การไหลของกำลังจริงในสายส่งจะเป็นไปตามสภาวะของระบบตามปกติ แต่ในกรณีที่ 2 เรากำหนดมุมของตัวเลื่อนเฟส $\phi_{23} = -1.748$ และ $\phi_{25} = -6.318$ โดยค่าของมุมทั้ง 2 นี้เป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณที่จะทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุดในกรณีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสที่สายส่งทั้ง 2 ตำแหน่งดังกล่าว เราจะพบว่ากำลังสูญเสียลดลงจากค่าปกติ 7.2182 MW ลงมาเป็น 6.3993 MW หรือลดลงมาราวๆ 11.3 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะการลดลงของกำลังสูญเสียเกิดจากการที่ตัวเลื่อนเฟสทั้ง 2 ตัวที่มีมุมที่เหมาะสมทำการควบคุมการ

ไหลของกำลังจริงในสายส่ง โดยลดขนาดการไหลของกำลังจริงในสายส่ง 2-3 จาก 24.37 MW ลงมาเป็น 21.98 MW ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียในสายส่ง 2-3 นี้ ลดลงจาก 0.37 MW ลงมาเป็น 0.31 MW ส่วนในสายส่ง 2-5 ตัวเลื่อนเฟส ทำให้กำลังจริงในสายส่ง 2-5 ลดลงจาก 52.63 MW ลงมาเป็น 33.09 MW ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียในสายส่ง 2-5 นี้ลดลงจาก 2.45 MW ลงมาเป็น 1.01 MW การที่ตัวเลื่อนเฟสทั้ง 2 ตัวควบคุมให้กำลังจริงในสายส่ง 2-3 และ 2-5 ลดลงมานี้ จะมีผลต่อการไหลของกำลังจริงในสายส่งอื่นๆที่เหลืออีก 5 เส้นในระบบ คือทำให้ในสายส่งบางเส้นมีกำลังจริงเพิ่มขึ้นจากเดิม หรือในสายส่งบางเส้นมีกำลังจริงลดลงจากเดิม เช่น ในสายส่ง 1-2 ขนาดการไหลของกำลังจริงจะลดลง ขณะที่ในสายส่ง 1-3 หรือสายส่ง 2-4 ขนาดการไหลของกำลังจริงจะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกำลังจริงในสายส่งนั้นก็ส่งผลทำให้กำลังสูญเสียในสายส่งนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยเช่นกัน โดยเมื่อกำลังจริงในสายส่งนั้นมีการไหลเพิ่มขึ้นกำลังสูญเสียของสายส่งนั้นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน และก็เป็นไปในทางกลับกันเมื่อการไหลของกำลังจริงมีขนาดลดลง สำหรับในกรณีนี้ 2 สามารถสรุปขนาดการไหลของกำลังจริงและกำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆก่อนและหลังการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสได้ดังตารางที่ 4.2

สายส่ง	กำลังจริงในสายส่ง (MW)		กำลังสูญเสียในสายส่ง (MW)		Δ LOSS (MW)
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
1-2	87.62	78.97	2.50	2.31	-0.19
1-3	40.46	48.02	1.63	2.09	+0.46
2-3	24.37	21.98	0.37	0.31	-0.06
2-4	27.62	42.21	0.18	0.38	+0.20
2-5	52.63	33.09	2.45	1.01	-1.44
3-4	19.79	24.93	0.04	0.07	+0.03
4-5	7.37	26.91	0.04	0.24	+0.20
					-0.80

ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงการไหลกำลังจริงในสายส่งต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆมีทั้งที่เพิ่มขึ้นและลดลง แต่ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆนั้นลดลง ดังใน ตารางที่ 4.2 ผลรวมของกำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆลดลง 0.8 MW นั่นคือกำลังสูญเสียของระบบมีค่าลดลงจากเดิม 0.8 MW ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากมุมที่เหมาะสมของ ตัวเลื่อนเฟสทั้ง 2 ตัว ถ้าเรากำหนดมุมของตัวเลื่อนเฟสเป็นค่าที่ไม่เหมาะสม แล้วนอกจากจะไม่สามารถลดกำลังสูญเสียของระบบลงมาให้ต่ำที่สุดอย่างที่ควรทำได้แล้ว ยังอาจทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าสูงขึ้นกว่าเมื่อไม่มีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสเลยก็ได้ดังผลของกรณีที่ 6 ในตารางที่ 4.1 การที่กำหนดมุมของตัวเลื่อนเฟสไม่เหมาะสมจะมีผลทำให้การไหลของกำลังจริงในสายส่งต่างๆเป็นไปอย่างที่ไม่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้การลดและเพิ่มของกำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆ เป็นไปในแนวทางที่ไม่ถูกต้อง และทำให้ผลรวมของกำลังสูญเสียในสายส่งแต่ละเส้นซึ่งคือกำลังสูญเสียของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นได้

มุมที่เหมาะสมของตัวเลื่อนเฟสแต่ละตัวนั้นไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็นลบ หรือทำให้กำลังจริงในสายส่งที่ติดตั้งตัวเลื่อนเฟสนั้นๆมีค่าลดลง ค่าของมุมที่เหมาะสมในแต่ละสายส่ง ในแต่ละกรณีนั้นแตกต่างกัน อาจมีค่าเป็นบวกหรือทำให้กำลังจริงในสายส่งนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นก็ได้ ซึ่งก็แล้วแต่ความเหมาะสมของระบบ และตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเลื่อนเฟส โดยวิธีการคำนวณที่กล่าวมาเบื้องต้นจะแสดงให้เห็นเองว่าถ้าติดตั้งตัวเลื่อนเฟสในลักษณะนี้ควรมีมุมของตัวเลื่อนเฟสแต่ละตัว เป็นเท่าใดเป็นค่าบวกหรือค่าลบ กำลังจริงในสายส่งนั้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่ไม่ว่าจะเป็นไปในแนวทางใดก็ตาม สำหรับมุมที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณ แล้วจะให้ผลเหมือนกันคือ ทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าลดลง ดังเช่นถ้าเราติดตั้งตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง 1-2 และ 2-5 เราจะสามารถหามุมที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุดสำหรับลักษณะการติดตั้งดังกล่าวเป็น $\phi_{12} = 1.313$ และ $\phi_{25} = -5.871$ ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าประมาณ 6.448 MW

ดังนั้นเราจะเห็นว่าในกรณีที่มีลักษณะการติดตั้งคือ จำนวนและตำแหน่งของตัวเลื่อนเฟสแตกต่างกันออกไป ค่าของมุมที่เหมาะสมของแต่ละกรณีก็จะแตกต่างกันออกไปด้วยดังเช่นที่สายส่ง 2-5 เมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง 2-3 และ 2-5 กับเมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง 1-2 และ 2-5 มุมที่เหมาะสมของตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง 2-5 จะไม่เหมือนกัน โดยมุมที่เหมาะสมในลักษณะการติดตั้งแบบหนึ่งจะทำให้กำลังสูญเสียสำหรับกรณีของตนมีค่าต่ำที่สุดแต่อาจสูงหรือต่ำกว่าลักษณะการติดตั้งแบบอื่นก็ได้

จากตารางที่ 4.1 เราพบว่าถ้าเลื่อนค่าของมุมออกจากค่าที่เหมาะสม (กรณีที่ 2) ไม่ว่าจะทางลบหรือบวก จะทำให้กำลังสูญเสียของระบบขยับตัวสูงขึ้น ดังกรณีที่ 3, 4 และ 5 นั้นแสดงว่าค่าของมุมในกรณีที่ 2 ที่ได้จากการคำนวณ เป็นค่าที่เหมาะสม (Optimal Value) จริงที่ทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำที่สุดสำหรับลักษณะการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่ง 2-3 และ 2-5 สำหรับ การศึกษาถึงผลของจำนวนและตำแหน่งของตัวเลื่อนเฟสที่มีต่อกำลังสูญเสียของ ระบบจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 5