บทที่ 4

ความไวของเนทเวอค

การหาขนาดสายส่งเส้นใหม่ในระบบไฟฟ้ากำลังให้เหมาะสมจะใช้ความไวของเนทเวอคเข้าช่วย ในบทนี้จะจำกัดขอบเขตเฉพาะการวางแผนงานขยายระบบส่งจ่ายเท่านั้น เพื่อความง่ายต่อการคำนวณจะจำกัดปัญหาลงเพียงด้านเทคนิคเท่านั้น ไม่นำราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษาหรือสภาวะทางเศรษฐศาสตร์ต่างๆ ทั้งในปัจจุบันและอนาคตมาพิจารณา

การขยายระบบไฟฟ้ากำลังนั้นอาจพิจารณาเกี่ยวกับ สถานที่ (Location) ของสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ที่จะก่อสร้างหรือที่มีอยู่แล้ว กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ และศูนย์กลางโหลด (Load Center) ในการวางแผนงานขยายระบบสายส่งจำเป็นต้องรู้ถึงสิ่งต่างๆ ดังข้างต้น รวมทั้งต้องรู้ความจุ (Capacity) ของสายส่ง ตลอดจนกระแสและกำลังงานไฟฟ้าจริงที่สายส่งสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย การวางแผนงานขยายสายส่งนั้นอาจทำได้โดยนำค่าความแตกต่างระหว่างความจุของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งมาคิดหาความไว (Sensitivity) เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบต่อไปจนกระทั่งไม่มีสายส่งเส้นใดเลยในระบบเกิดสภาวะโหลดเกิน (Over Load) ขึ้น นั่นหมายถึงระบบสายส่งนี้สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามต้องการ

ในกรณีที่โหลดของระบบเพิ่มขึ้น แต่สายส่งทุกเส้นยังไม่เกิดสภาวะโหลดเกินขึ้นแล้ว การขยายระบบอาจยังไม่จำเป็นนัก แต่เมื่อไรก็ตามที่เกิดสภาวะโหลดเกินขึ้นในสายส่งเดิมแล้ว จึงจำเป็นต้องเพิ่มสายส่งเส้นใหม่เข้าในระบบ การคำนวณหาสายส่งเส้นใหม่อาจใช้วิธีอิทเทอเรทีฟ (Iterative Methods) คำนวณซ้ำๆ เป็นรอบๆ จนกระทั่งได้สายส่งเส้นใหม่ที่ไม่ทำให้เกิดสภาวะโหลดเกินขึ้นจึงหยุดการคำนวณ

4.1 ความไวของเนทเวอค (Network Sensitivities) (1,8)

การหาความไวของเนทเวอคจะอาศัยทฤษฎีของเทลิเกน (Tellegen's Theorem) เข้าช่วย โดยมีเนทเวอคเดิมและแอดจอยส์เนทเวอค (Adjoint Network) ซึ่งเป็นเนทเวอคทางคณิตศาสตร์ที่มีกราฟของวงจรเหมือนกับเนทเวอคเดิม

กำหนดให้

i และ v แทน กระแสและแรงดันของเนทเวอคเดิม

$\tilde{i}$ และ $\tilde{v}$ แทน กระแสและแรงดันของแอดจอยส์เนทเวอค

ทั้ง v และ i หรือ $\tilde{v}$ และ $\tilde{i}$ จะเป็นไปตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ทั้งกฎของกระแสและแรงดัน อาศัยทฤษฎีของเทลิเกนส์ จะได้

$$\sum_{m=1}^{E} \tilde{v}_m i_m = 0 \qquad (4.1)$$

และ

$$\sum_{m=1}^{E} v_m \tilde{i}_m = 0 \qquad (4.2)$$

E แทน จำนวน Branch ของกราฟของวงจร

เมื่อค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ในวงจรหรือเนทเวอคเปลี่ยนไป ทำให้กระแสและแรงดันในแต่ละ Branch เปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นสามารถหาความไวของเนทเวอคเทียบกับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ ให้ Δi และ Δv เป็นกระแสและแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นสมการ (4.1) และ (4.2) สามารถเขียนได้เป็นสมการ (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ

$$\sum_{m=1}^{E} (v_m + \Delta v_m)\tilde{i}_m = 0 \qquad (4.3)$$

$$\sum_{m=1}^{E} \tilde{v}_m(i_m + \Delta i_m) = 0 \qquad (4.4)$$

กระจายสมการ (4.3) และ (4.4) จะได้

$$\sum_{m=1}^{E} v_m \tilde{i}_m + \sum_{m=1}^{E} \Delta v_m \tilde{i}_m = 0 \qquad (4.5)$$

$$\sum_{m=1}^{E} \tilde{v}_m i_m + \sum_{m=1}^{E} \tilde{v}_m \Delta i_m = 0 \qquad (4.6)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ้าค่ากระแสและแรงดันเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังนั้นจากสมการ (4.1) และ (4.2) ทำให้สมการ (4.5) และ (4.6) จัดรูปลงเป็น

$$\sum_{m=1}^{E} \Delta v_m \tilde{i}_m = 0 \qquad (4.7)$$

$$\sum_{m=1}^{E} \tilde{v}_m \Delta i_m = 0 \qquad (4.8)$$

สมการ (4.7) ลบด้วยสมการ (4.8) จะได้

$$\sum_{m=1}^{E} (\Delta v_m \tilde{i}_m - \tilde{v}_m \Delta i_m) = 0 \qquad (4.9)$$

การหาความไวของเนทเวอค เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของอิลิเมนต์ (Element) เปลี่ยนไปนั้นอาจหาเทียบกับแรงดันที่จุดต่างๆ ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial v_m}{\partial y_m} \quad , \quad m=1, \ldots, E \qquad (4.10)$$

กำหนดให้

$$i_m = f(v_m, y_m) \ , \ m=1, \ldots, E \qquad (4.11)$$

ดังนั้น

$$\Delta i_m = \frac{\partial f}{\partial v_m} \Delta v_m + \frac{\partial f}{\partial y_m} \Delta y_m \qquad (4.12)$$

แทนค่าสมการ (4.12) ลงในสมการ (4.9) จัดรูปใหม่จะได้

$$\Delta v_p \tilde{i}_p - \tilde{v}_p \Delta i_p + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq p}}^{E} (\tilde{i}_m - \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial v_m}) \Delta v_m - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq p}}^{E} \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial y_m} \Delta y_m = 0 \qquad (4.13)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากแอดจอยส์เนทเวอคนั้นสามารถกำหนดคุณสมบัติได้ตามต้องการ ดังนั้นกำหนดให้

$$\tilde{i}_m - \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial v_m} = 0 \qquad \text{ทุกๆ} \quad m \neq p$$

จัดรูปได้

$$\frac{\tilde{i}_m}{\tilde{v}_m} = \frac{\partial f}{\partial v_m} = \tilde{Y}_m \qquad m \neq p \qquad (4.14)$$

พิจารณาสมการ (4.14) สังเกตุได้ว่าที่อิลิเมนต์ m ในเนทเวอคเดิมสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

กรณี 1 ถ้าหากเป็น แหล่งกำเนิดแรงดันคงที่ (Constant Voltage Source) ดังนั้นค่า $\frac{\partial f}{\partial v_m} = \infty$ ซึ่งในแอดจอยส์เนทเวอคมีสภาพเป็นลัดวงจร (Short Circuit)

กรณี 2 ถ้าหากเป็น แหล่งกำเนิดกระแสคงที่ (Constant Current Source) ดังนั้นค่า $\frac{\partial f}{\partial v_m} = 0$ ซึ่งในแอดจอยส์เนทเวอคมีสภาพเป็นเปิดวงจร (Open Circuit)

กรณี 3 ถ้าหากเป็น แอดมิแตนส์คงที่ (Constant Admittance) ทำให้แอดจอยส์เนทเวอคมีสภาพเป็นแอดมิแตนส์นั้น

จากคุณสมบัติ (4.14) จะทำให้สมการ (4.13) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\Delta v_p \tilde{i}_p - \tilde{v}_p \Delta i_p - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq p}}^{E} \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial y_m} \Delta y_m = 0 \qquad (4.15)$$

แทนค่าสมการ (4.12) ลงใน (4.15) จัดรูปได้

$$\Delta v_p (\tilde{i}_p - \tilde{v}_p \frac{\partial f}{\partial v_p}) - \tilde{v}_p \frac{\partial f}{\partial y_p} \Delta y_p - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq p}}^{E} \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial y_m} \Delta y_m = 0 \qquad (4.16)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากเงื่อนไข (4.14) เป็นการกำหนดคุณสมบัติของแอดจอยส์เนทเวอคที่ $m \neq p$ ดังนั้นจะกำหนดคุณสมบัติที่ $m = p$ เป็น

$$\tilde{i}_p - \tilde{v}_p \frac{\partial_f}{\partial v_p} = 1$$

$$\tilde{i}_p = 1 + \tilde{v}_p \frac{\partial_f}{\partial v_p} \qquad (4.17)$$

คุณสมบัติ (4.17) เป็นการกำหนดแอดจอยส์เนทเวอคอิลิเมนต์ P มีคุณสมบัติเป็นแหล่งกำเนิดกระแสที่ถูกควบคุมโดยแรงดัน (Voltage - Controlled Current Source) จากคุณสมบัตินี้ สมการ (4.16) ลดรูปลงเป็น

$$\Delta v_p = \tilde{v}_p \frac{\partial_f}{\partial y_p} \Delta y_p + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq p}}^{E} \tilde{v}_m \frac{\partial_f}{\partial y_m} \Delta y_m \qquad (4.18)$$

หาพาเชียลดิฟเฟอร์เรนเชียล์ในสมการ (4.18) เทียบกับ y_m ได้

$$\frac{\partial v_p}{\partial y_m} = \tilde{v}_m \frac{\partial_f}{\partial y_m} \qquad (4.19)$$

สมการ (4.19) แสดงถึงความไวของ v_p นั้นจะขึ้นอยู่กับทุกๆ อิลิเมนต์ y_m

4.2 การออกแบบอัตโนมัติ (Automated Design)

การออกแบบเนทเวอคเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ y_m, m=1, ... , L โดยที่ y_m ไม่เป็นอิสระ (Dependent) จากกระแสและแรงดันผ่านตัวมัน

กำหนดให้

L แทน จำนวน y_m

E แทน จำนวนอิลิเมนต์ทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขของการออกแบบจะใช้วิธีเวกเตอร์ผิดพลาดกำลังสอง (Error Square Function) โดยมีนิยามดังนี้

$$J = \frac{1}{2}(X - A)^2 \qquad (4.20)$$

X แทน กระแส, แรงดัน, กำลังไฟฟ้าจริง ที่ผ่านอิลิเมนต์นั้น

A แทน กระแส, แรงดัน, กำลังไฟฟ้าจริง ที่ต้องการให้ผ่านอิลิเมนต์นั้น มีค่าคงที่

การหาค่าพารามิเตอร์ Y_m ใช้วิธีอิทเทอเรทีฟ โดยวิธีสตีฟเนสส์ ดีเซนส์ (Steepest Descent)

$$Y_m^{new} = Y_m^{old} - \alpha\left(\frac{\partial J}{\partial Y_m}\right) \qquad (4.21)$$

α แทน ค่าคงที่บวก

4.2.1 <u>วิธีหาค่าแกรเดียนส์ เวกเตอร์</u> (Gradient Vector)

จากสมการ (4.20) ถ้าเลือก J ให้เป็นฟังค์ชั่นของแรงดัน ดังนั้นสามารถเขียนได้เป็น

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial y_1} &= g_1(v_1)W_{11}\frac{\partial v_1}{\partial y_1} + \cdots\cdots + g_L(v_L)W_{LL}\frac{\partial v_L}{\partial y_1}\\ &\vdots\\ \frac{\partial J}{\partial y_L} &= g_1(v_1)W_{11}\frac{\partial v_1}{\partial y_L} + \cdots\cdots + g_L(v_L)W_{LL}\frac{\partial v_L}{\partial y_L}\end{aligned}\right\} \qquad (4.22)$$

$g_m(v_m)$ แทน สัมประสิทธิ์ของ v_m

W_{mm} แทน ค่าคงที่แสดงความสำคัญของ $\frac{\partial v_m}{\partial y_m}$ โดยทั่วไป W_{mm} จะมีค่าเป็น 1

อาศัยทฤษฎีของเทลิเกน เริ่มจากสมการ (4.12) แทนค่าลงในสมการ (4.9) จัดอิลิเมนต์ที่เป็นอิสระจากกระแสหรือแรงดัน (คือ แหล่งกำเนิดนั่นเอง) อยู่ในกลุ่มเดียวกัน จัดอิลิเมนต์ที่ไม่อิสระจากกระแสหรือแรงดันอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งจะได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\sum_{n=L+1}^{E} (\Delta v_n \tilde{i}_n - \tilde{v}_n \Delta i_n) + \sum_{m=1}^{E} (\tilde{i}_m - \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial v_m}) \Delta v_m = \sum_{m=1}^{L} \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial y_m} \Delta y_m \qquad (4.23)$$

เทอมแรกของสมการ (4.23) มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากเป็นอิลิเมนต์ที่เป็นอิสระต่อกระแสและแรงดัน สมการ (4.23) จะลดรูปลงเป็น

$$\sum_{m=1}^{L} (\tilde{i}_m - \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial v_m}) \Delta v_m = \sum_{m=1}^{L} \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial y_m} \Delta y_m \qquad (4.24)$$

กำหนดให้

$$\tilde{i}_m - \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial v_m} = g_m(v_m) W_{mm} \qquad (4.25)$$

แทนค่าสมการ (4.25) ลงในสมการ (4.24) แล้วหาพาเชียลดิฟเฟอเรนเชียล์เทียบกับ y_m จะได้

$$g_1(v_1) W_{11} \frac{\partial v_1}{\partial y_m} + ... + g_L(v_L) W_{LL} \frac{\partial v_L}{\partial y_m} = \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial y_m} \qquad (4.26)$$

ทางซ้ายมือของสมการ (4.26) คือ $\frac{\partial J}{\partial y_m}$ ในสมการ (4.22) ดังนั้น

$$\frac{\partial J}{\partial y_m} = \tilde{v}_m \frac{\partial f}{\partial y_m}, \quad m=1, \ldots, L \qquad (4.27)$$

กรณีของระบบเชิงเส้น (Linear System) และ f เป็นไปตามสมการ (4.11)

$$\frac{\partial f}{\partial y_m} = v_m$$

ดังนั้นสมการ (4.27) จะเป็น

$$\frac{\partial J}{\partial y_m} = \tilde{v}_m v_m \qquad (4.28)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 การออกแบบสายส่งให้ควบคุมแรงดันที่บัส

จากหัวข้อ (4.2.1) สามารถนำมาใช้ในการออกแบบขนาดสายส่งให้ควบคุมแรงดันที่บัสได้ โดยอิลิเมนต์ y_m เชื่อมโยงอยู่กับบัสใดๆ กับบัส m ที่ต้องการควบคุมแรงดัน ให้เวคเตอร์ผิดพลาดกำลังสอง J มีนิยามดังนี้

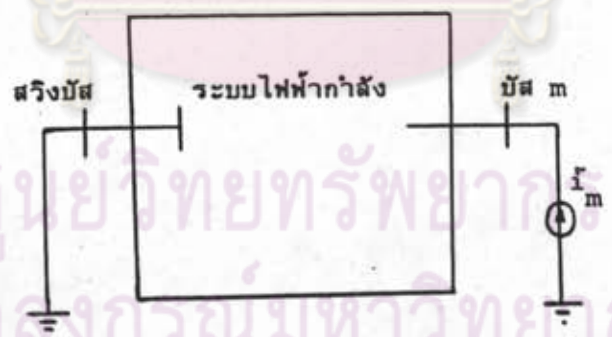
$$J = \frac{1}{2}(v_m - v_{SPECM})^2 \qquad (4.29)$$

v_m แทน แรงดันที่ได้จากโหลดโฟลว์ที่บัส m

v_{SPECM} แทน แรงดันที่ต้องการที่บัส m

จากหัวข้อ (4.1) เนื่องจากสวิงซ์บัสมีแรงดันคงที่ ดังนั้นในแอดจอยส์เนทเวอคกลายเป็นลัดวงจรที่บัส m ในแอดจอยส์เนทเวอคบ้อนแหล่งกำเนิดกระแสมีค่า

$$\tilde{I}_m = -(v_m - v_{SPECM}) \qquad (4.30)$$



รูปที่ 4.1 แสดงแอดจอยส์เนทเวอค

ดังนั้นจาก KCL

$$[\tilde{I}] = [y][\tilde{v}]$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระจายจะได้

$$\tilde{i}_m = y_{m1}\tilde{v}_1 + \ldots + y_{mm}\tilde{v}_m + \ldots + y_{mE}\tilde{y}_E$$

เนื่องจากบัสแอดมิแตนซ์เมทริกซ์นั้น สมาชิกในแนวแทยงมีค่ามากกว่านอกแนวแทยง ดังนั้นอาจประมาณได้ว่า

$$\tilde{i}_m \approx y_{mm}\tilde{v}_m \qquad (4.31)$$

จากสมการ (4.30) และ (4.31) จะได้ค่า $\tilde{v}_m$ เป็น

$$\tilde{v}_m = -\frac{v_n - v_{SPECM}}{y_{mm}} \qquad (4.32)$$

จากสมการ (4.28) และ (4.32) หาค่า $\frac{\partial J}{\partial y_m}$ ได้ และหาค่า y_m^{new} ได้ตามสมการ (4.21) ทำดังนี้เรื่อยไป จนกระทั่งค่า J มีขนาดน้อยตามที่กำหนด จึงจบการคำนวณ

อีกกรณีหนึ่งเมื่อหาค่า J ได้แล้ว จะหาค่า y_m^{new} ได้โดย

$$\Delta J = J^{k-1} - J^k \qquad (4.33)$$

k แทน จำนวนรอบที่ทำการอิทเทอเรทีฟ

ถ้า k มีค่าเป็น 0 หรืออิทเทอเรทีฟแรกจะให้ J^{k-1} มีค่าเป็น 0

ค่า Δy_m หาได้โดย

$$\Delta y_m = \frac{\Delta J}{\frac{\partial J}{\partial y_m}} \qquad (4.34)$$

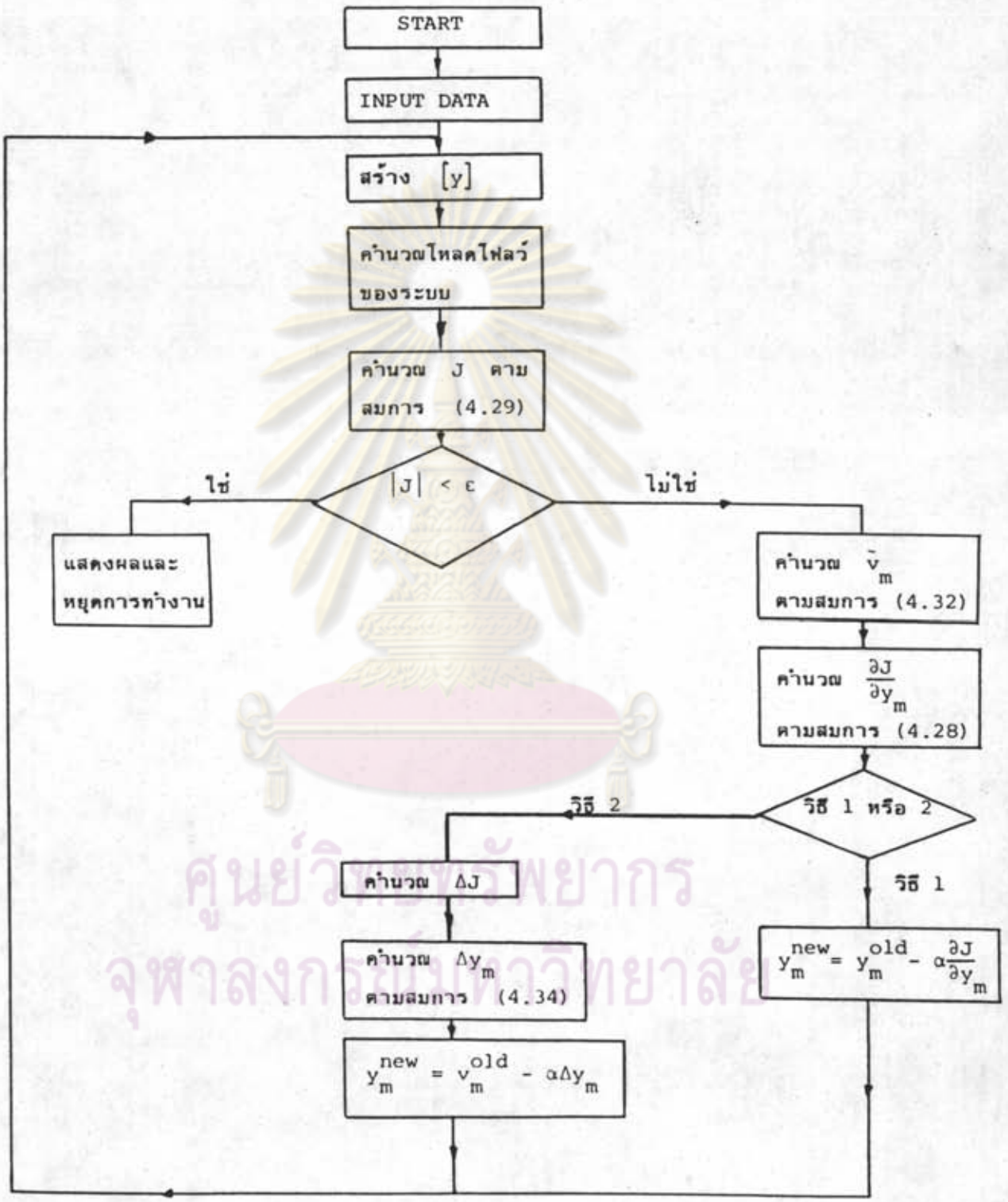
ดังนั้น y_m^{new} หาได้โดย

$$y_m^{new} = y_m^{old} - \alpha\, \Delta y_m$$

วิธีการนี้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ในสายส่งที่ควบคุมแรงดันได้ทั้งขนาดและมุมของแรงดันที่บัสนั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไฟลว์ชาร์ทของการออกแบบสายส่งควบคุมแรงดันที่บัส



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การวางแผนงานขยายระบบสายส่ง (Transmission Expansion Planning)

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) ในสภาวะคงตัว (Steady State) มีลักษณะเป็นระบบเชิงเส้น (Linear System) ซึ่งสอดคล้องกับสมการโหลดโฟลว์ (Load - Flow Equation) ที่ไม่เชิงเส้น (Non Linear) และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์อาจใช้วิธี DC Power-Flow วิเคราะห์ในการวางแผนงานขยายระบบสายส่ง

4.3.1 วิธี DC Power-Flow (8)

วิธี DC Power-Flow นั้นสมมุติให้ความต้านทาน (Resistance) และความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสายส่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสายส่งจึงมีเพียงความเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่ไม่มีผลจากสนามแม่เหล็กโยงถึงกัน การสมมุติเช่นนี้ช่วยลดความยุ่งยากในการคำนวณหาความไวของเนทเวอค โดยหลีกเลี่ยงคณิตศาสตร์ของตัวแปรเชิงซ้อน (Complex Variables) ที่ต้องใช้ทฤษฎีของควอชี่-รีมันส์ (Cauchy-Riemann) ในการหาพาเชียลดิฟ-เฟอร์เรนเชียลของตัวแปรเชิงซ้อน ถ้าประมาณให้ขนาดของแรงดันที่ปลายสายส่งถูกควบคุมไว้ใกล้เคียง 1 ต่อหน่วย (Per Unit) และมุมของแรงดันมีค่าแตกต่างกันน้อย

จากวิธี DC Power-Flow จะได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง

$$P_{ij} = |V_i V_j| \frac{\sin(\delta_i - \delta_j)}{x_{ij}}$$

จะประมาณได้ว่า

$$P_{ij} = \frac{\delta_i - \delta_j}{x_{ij}} \qquad (4.35)$$

P_{ij} แทน กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง

δ_i, δ_j แทน มุมของแรงดันที่ปลาย 2 ข้างของสายส่ง

x_{ij} แทน รีแอคแตนส์ (Reactance) ของสายส่ง

กำลังไฟฟ้าจริงที่ผ่านบัสจะเขียนได้เป็น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$P_i = \sum_{j=1}^{k} \left(\frac{\delta_i - \delta_j}{x_{ij}}\right) \quad (4.36)$$

P_i แทน กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i

k แทน จำนวนสายส่งที่เชื่อมกับบัส i

สมการ (4.36) อาจเขียนได้อีกรูปหนึ่ง คือ

$$P_i = \sum_{j=1}^{k} P_{ij} \quad (4.37)$$

กำหนดให้

$$B_{ij} = \frac{1}{x_{ij}}$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (4.38)$$

B_{ij} แทน Susceptance ของสายส่ง

สมการ (4.35) สามารถเขียนได้เป็น

$$P_{ij} = B_{ij}\,\delta_{ij} \quad (4.39)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 <u>การหาค่าแกรเดียนส์ เวคเตอร์</u> (Determining Gradient Vector)

อาศัยทฤษฎีของเทลิเกนและวิธี DC Power-Flow P_{ij} และ δ_{ij} สามารถเปรียบเทียบได้กับ v และ i นั่นเอง เพื่อความสะดวกจะแทนสัญญลักษณ์ ij ด้วย m ดังนั้นจากสมการ (4.9) สามารถเขียนได้ว่า

$$\sum_{m=1}^{E} (\tilde{P}_m \Delta\delta_m - \tilde{\delta}_m \Delta P_m) = 0 \quad (4.40)$$

E แทน จำนวนอิลิเมนต์ทั้งหมด

P_m แทน กำลังจริงที่ไหลในอิลิเมนต์ m

δ_m แทน ความแตกต่างของมุมแรงดันที่ปลายอิลิเมนต์ m

ให้

L แทน จำนวนสายส่งทั้งหมด

ให้สวิงบัสอยู่ที่บัส 1 อิลิเมนต์ที่ต่อกับบัส 1 ลงกราวน์จะมีค่ามุมที่แตกต่างจากบัส 1 เป็น 0 สมการ (4.39) สามารถหา ΔP_m ให้เป็น

$$\left.\begin{aligned} \Delta P_m &= B_m \Delta\delta_m + \delta_m \Delta B_m , \quad m = 2, \ldots , L \\ \Delta\delta_1 &= 0 \\ \Delta P_m &= 0 \qquad\qquad m = L+1, \ldots , E \end{aligned}\right\} \quad (4.41)$$

และ

จากชุดของสมการ (4.41) ทำให้สมการ (4.40) กลายเป็น

$$\sum_{m=L+1}^{E} \Delta\delta_m \tilde{P}_m + \sum_{m=2}^{L} \left(\frac{\tilde{P}_m}{B_m} - \tilde{\delta}_m\right)\Delta P_m - \tilde{\delta}_1 P_1 = \sum_{m=2}^{L} \frac{\delta_m \tilde{P}_m \Delta B_m}{B_m} \quad (4.42)$$

เนื่องจากแอคจอยส์เนทเวอคสามารถกำหนดคุณสมบัติที่เหมาะสมได้ ดังนั้นเลือกให้

$$\tilde{P}_n = 0 , \quad n = L+1, \ldots , E$$

และ

$$\tilde{\delta}_1 = 0$$

นั่นคือสมการ (4.42) คล้ายกับสมการ (4.24) ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของ P_m ในสมการ (4.42) สามารถกำหนดให้เป็น $\frac{\partial J}{\partial P_m}$ จากสมการ (4.25) จะได้

$$\frac{\tilde{P}_m}{B_m} - \tilde{\delta}_m = \frac{\partial J}{\partial P_m} = g_m(P_m) W_{mm} \quad (4.43)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเลือกสายส่งเส้นใหม่ที่สำคัญที่สุด คือ ต้องไม่ทำให้สายส่งทุกเส้นเกิดสภาวะไหลเกินขึ้น ดังนั้นเลือก $g_m(P_m)$ เป็น

$$g_m(P_m) = P_m - C_m \qquad (4.44)$$

โดย

C_m แทน ความจุ (Capacity) กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่ง m มีค่าคงที่

อาศัยสมการ (4.44) จัดรูปสมการ (4.43) ใหม่จะได้

$$\tilde{P}_m = B_m\tilde{\delta}_m + B_m(P_m - C_m)W_{mm} \qquad (4.45)$$

สมการ (4.42) สามารถเขียนได้เป็น

$$\sum_{m=2}^{L} g_m(P_m)W_{mm}\Delta P_m = \sum_{m=2}^{L} \frac{\delta_m \tilde{P}_m}{B_m}\Delta B_m \qquad (4.46)$$

เปรียบเทียบสมการ (4.44) และ (4.46) จะได้ว่า

$$\frac{\partial J}{\partial B_m} = \frac{\delta_m \tilde{P}_m}{B_m} \quad , m = 2, \ldots, L \qquad (4.47)$$

แทนค่าสมการ (4.45) ลงในสมการ (4.47) จัดรูปจะได้

$$\frac{\partial J}{\partial B_m} = \delta_m\tilde{\delta}_m + \delta_m(P_m - C_m)W_{mm} \quad , m = 2, \ldots, L \qquad (4.4$$

ในการออกแบบสายส่งอัพไนบัตินั้นเป็นปัญหาที่ต้องใช้สมการไหลไฟลว์ของเนทเวอคเดิม และนำข้อมูลจากไหลไฟลว์ใช้ในแอคจอยส์เนทเวอค โดยอาศัยสมการ (4.48) หาค่าพารามิเตอร์ใหม่เป็นอิทเทอเรทีฟ เมื่อได้ระบบสายส่งที่ไม่มีสายส่งเส้นใดเกิดสภาวะไหลเกินแล้ว สามารถถือว่าสายส่งของระบบนั้นสามารถใช้งานได้ ดังนั้นเงื่อนไขของการออกแบบ คือ

$$P_m - C_m \leq 0 \qquad (4.49)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากวิธี DC Power-Flow สามารถเขียนสมการในรูปบัสแอดมิแทนซ์เมทริกซ์ได้

$$[B]\ [\delta] \quad = \quad [P] \tag{4.50}$$

เนื่องจากที่สวิงบัสถูกกำหนดให้อยู่ที่บัส 1 และมีค่า δ_1 เป็น 0 กำลังไฟฟ้าจริงที่ผ่านบัสต่างๆ รู้ค่าแน่นอน ดังนั้นสามารถหาค่า $[\delta]$ ได้

ในทำนองเดียวกันในแอคจอยส์เนทเวอคสามารถเขียนได้

$$[B]\ [\tilde{\delta}] \quad = \quad [\tilde{P}] \tag{4.51}$$

โดยให้ $\tilde{\delta}_1$ มีค่าเป็น 0 และ W_{mm} มีค่าเป็น 1

การหาค่า $[\tilde{P}]$ จะหาจาก $\tilde{P}_m$ ที่ผ่านบัสต่างๆ ตามสมการ (4.45) ซึ่งเป็น $\tilde{P}_m$ ที่ไหลผ่านสายส่ง แล้วนำมารวมกันจึงจะได้ $\tilde{P}$ ที่บัสต่างๆ แต่สมการ (4.45) มีค่า $\tilde{\delta}_m$ อยู่ด้วย เนื่องจากค่า $\tilde{\delta}_m$ ซึ่งเป็นความแตกต่างของมุมที่ปลายสายส่งในแอคจอยส์เนทเวอคนั้นมีค่าน้อย และ $\tilde{\delta}_m$ มีค่าน้อย ดังนั้นจึงประมาณได้เป็น

$$\tilde{P}_k \quad = \quad \sum_{i=1}^{N} B_i(P_i - C_i) \tag{4.52}$$

$\tilde{P}_k$ แทน $\tilde{P}$ ที่บัส k

N แทน จำนวนสายส่งที่เชื่อมกับบัส k ทั้งหมด

โดยที่ทิศทางของ $B_i(P_i - C_i)$ เป็นไปตามทิศการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในไหลคไฟลว์ของเนทเวอคเดิม

จากสมการ (4.50) ถึง (4.52) สามารถคำนวณ $\frac{\partial J}{\partial B_m}$ ในสมการ (4.48) ได้ และนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งเส้นใหม่ได้โดยอาศัยสมการ (4.21)

$$y_m^{new} \quad = \quad y_m^{old} - \alpha \frac{\partial J}{\partial y_m}$$

จากสมการ (3.9) อาศัยวิธี DC Power-Flow จะได้ว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$Y_m = -j\,B_m \tag{4.53}$$

ดังนั้นแทนค่า Y_m จะได้

$$-j\,B_m^{new} = -j\,B^{old} - \alpha \frac{\partial J}{\partial(-j\,B_m)}$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$B_m^{new} = B_m^{old} + \alpha \frac{\partial J}{\partial B_m} \tag{4.54}$$

ค่า B_m ใหม่นี้นำกลับไปแก้สมการไหลผลไฟลว์แล้วเช็คให้เป็นไปตามเงื่อนไข (4.49) จึงเสร็จสิ้นการคำนวณ

4.3.3 การปรับปรุงวิธี DC Power-Flow

เนื่องจากการประมาณสายส่งมีเพียงรีแอคแตนซ์เท่านั้น จากระบบไฟฟ้ากำลังจริงๆ นั้นค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรีแอคแตนซ์นั้นซึ่ง

$$R \ll X_L$$

$$Y_e \ll X_L$$

R แทน ความต้านทานของสายส่ง

X_L แทน รีแอคแตนซ์ของสายส่ง

Y_e แทน แอดมิแตนซ์ลงกราวน์ของสายส่ง

ดังนั้น [B] ในสมการ (4.50) และ (4.51) นั้นอาจใช้ค่า $-I_m[Y_{BUS}]$ ได้เลยโดย

$$[B] = -I_m[Y_{BUS}]$$

ซึ่งมีค่าผิดพลาดไม่มากนัก ทั้งนี้เพื่อความรวดเร็วในการคำนวณไม่ต้องหา [B] อีก และเนื่องจากสมการ (4.50) ผลที่ได้คือ [δ] ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับมุมของแรงดันที่ได้จากไหลผลไฟลว์ ดังนั้นอาจละทิ้งสมการ (4.50) ได้โดยใช้ผลจากไหลผลไฟลว์ได้เลย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประมาณสายส่งมีเพียงรีแอคแตนซ์ เมื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงตามสมการ (4.39) อาจไม่สอดคล้องกับโหลดโฟลว์ ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีคำนวณหากำลังไฟฟ้าจริงโดย

$$P = R_e(S^*) = R_e(vi^*) \quad (4.55)$$

i จะหาได้โดย

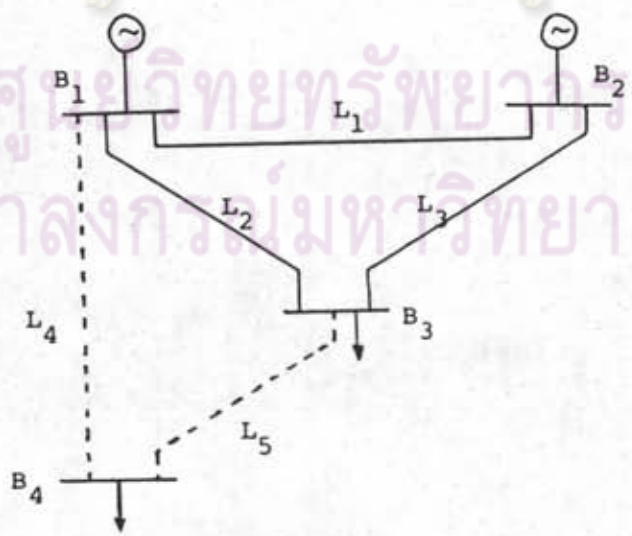
$$i = \frac{v_i - v_j}{z_{ij}} \quad (4.56)$$

v_i และ v_j แทน แรงดันที่ปลายสายส่ง

z_{ij} แทน อิมพิแดนซ์ของสายส่ง

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากสมการ (4.55) จะนำไปใช้ในเงื่อนไข (4.49) และสมการ (4.48), (4.52)

ในกรณี ระบบไฟฟ้ากำลังตามรูปที่ 4.2 ต้องการใส่สายส่งเส้น 4 และ 5 เพื่อขยายระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีสภาวะที่บัสต่างๆ ตามตารางที่ 4.1 กำหนดค่าเริ่มต้นของสายส่งตามตารางที่ 2 เลือกใช้โหลดโฟลว์โดยวิธีเรคแทงกูล่า ไค-ออร์ดิเนต เลือกตัวเร่ง 30 Savety Factor 3.00



รูปที่ 4.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง 4 บัส 3 ไลน์ มี L_4 และ L_5 เป็นสายส่งเส้นใหม่ที่ต้องการเพิ่มในระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BUS	TYPE	GEN		LOAD		VSPEC	KV
		MW	MVAR	MW	MVAR	(PU)	
1	3	----	----	00.0	00.0	1.00	100.0
2	1	400.0	00.0	00.0	00.0	1.00	100.0
3	1	00.0	00.0	400.0	00.0	1.00	100.0
4	1	00.0	00.0	400.0	00.0	1.00	100.0

ตารางที่ 4.1 สภาวะที่บัสต่างๆ ที่กำหนดให้

LINE	BUS S-E	IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1-2	0.00 + J 0.067	0.00 + J 0.00	100.0	900.0	6.00
2	1-3	0.00 + J 0.10	0.00 + J 0.00	100.0	900.0	9.00
3	2-3	0.00 + J 0.10	0.00 + J 0.00	100.0	900.0	9.10
4	1-4	0.00 + J 0.10	0.00 + J 0.00	100.0	900.0	9.60
5	3-4	0.00 + J 0.067	0.00 + J 0.00	100.0	600.0	6.0

ตารางที่ 4.2 สภาวะเริ่มต้นของสายส่ง

รายละเอียดการคำนวณในแต่ละรอบได้แสดงดังต่อไปนี้

```
C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.365110
C-POW =    3.000000  LINE POW =    1.172769

C-AMP =    3.000000  LINE AMP =    2.393516
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.223856

C-AMP =    3.020000  LINE AMP =    3.031363
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.827249

C-AMP =    3.200000  LINE AMP =    3.135013
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.948997

C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.120259
C-POW =    2.000000  LINE POW =    1.051050

          OVER LOAD =   1
 25.000000  -10.000000    0.000000
-10.000000   35.000000  -15.000000      [B]
  0.000000  -15.000000   25.000000
 29.136492    4.744602  -14.744820  <-- P
  1.302774    0.343287   -0.383821  <-- δ

YSER =   0.000 +J   -6.818          L4 (new)
YSHT =   0.000 +J    0.000

YSER =   0.000 +J  -15.529          L5 (new)
YSHT =   0.000 +J    0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.363694
C-POW =    3.000000  LINE POW =    1.006852


C-AMP =    3.000000  LINE AMP =    2.841578
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.561559


C-AMP =    3.020000  LINE AMP =    3.291095
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.993173


C-AMP =    3.200000  LINE AMP =    2.685672
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.445333


C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.703048
C-POW =    2.000000  LINE POW =    1.554661

          OVER LOAD =   1
 25.000000  -10.000000    0.000000
-10.000000   35.528767  -15.528766
  0.000000  -15.528766   22.346640
 29.966097    2.461933  -10.697205
  1.333950    0.338264   -0.243633

YSER =   0.000 +J -10.595

YSHT =   0.000 +J   0.000

YSER =   0.000 +J -15.035

YSHT =   0.000 +J   0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.394316
C-POW =    3.000000  LINE POW =    1.196982

C-AMP =    3.000000  LINE AMP =    2.332471
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.176019

C-AMP =    3.020000  LINE AMP =    2.996410
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.803040

C-AMP =    3.200000  LINE AMP =    3.178941
C-POW =    3.000000  LINE POW =    3.021042

C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.040231
C-POW =    2.000000  LINE POW =    0.978991

          OVER LOAD =   1
 25.000000  -10.000000    0.000000
-10.000000   35.034645  -15.034641
  0.000000  -15.034641   25.629612
 29.015383    5.140381  -15.127563
  1.302366    0.354376   -0.382356

YSER =   0.000 +J  -6.885

YSHT =   0.000 +J   0.000

YSER =   0.000 +J -15.669

YSHT =   0.000 +J   0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
C-AMP =   1.000000  LINE AMP =   1.362035
C-POW =   3.000000  LINE POW =   1.009746

C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   2.831263
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.554924

C-AMP =   3.000000  LINE AMP =   3.235304
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.990274

C-AMP =   3.200000  LINE AMP =   2.693046
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.454859

C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   1.695686
C-POW =   2.000000  LINE POW =   1.545135

          OVER LOAD =   1
 25.000000  -10.000000    0.000000
-10.000000   35.659695  -15.659692
  0.000000  -15.659692   22.544344
 29.951674    2.574091  -10.876155
  1.332798    0.336827   -0.248468

YSER =   0.000 +J -10.461

YSHT =   0.000 +J   0.000

YSER =   0.000 +J -15.196

YSHT =   0.000 +J   0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C-AMP = 1.000000 LINE AMP = 1.391131
C-POW = 1.000000 LINE POW = 1.190443

C-AMP = 3.000000 LINE AMP = 2.348706
C-POW = 3.000000 LINE POW = 2.188617

C-AMP = 3.000000 LINE AMP = 3.005380
C-POW = 3.000000 LINE POW = 2.809580

C-AMP = 3.000000 LINE AMP = 3.181390
C-POW = 3.000000 LINE POW = 3.001395

C-AMP = 1.000000 LINE AMP = 1.061254
C-POW = 1.000000 LINE POW = 0.998128

OVER LOAD = 1

25.000000	-10.000000	0.000000
-10.000000	35.195530	-15.195527
0.000000	-15.195527	25.653244
29.048067	5.205227	-15.204161
1.302841	0.352296	-0.383955

YSER = 0.000 +J -6.385

YSHT = 1.000 +J 0.000

YSER = 0.000 +J -15.786

YSHT = 0.000 +J 0.000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   1.361204
C-POW =   3.000000  LINE POW =   1.008715


C-AMP =   3.000000  LINE AMP =   2.832885
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.556657


C-AMP =   3.020000  LINE AMP =   3.286370
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.991306


C-AMP =   3.200000  LINE AMP =   2.689656
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.452096


C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   1.698502
C-POW =   2.000000  LINE POW =   1.547899

          OVER LOAD =   1
 25.000000  -10.000000    0.000000
-10.000000   35.785580  -15.785575
  0.000000  -15.785575   22.670820
 29.956812    2.615364  -10.909125
  1.332966    0.336735   -0.246730

YSER =   0.000 +J -10.510
YSHT =   0.000 +J   0.000

YSER =   0.000 +J -15.321
YSHT =   0.000 +J   0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
I-AMP =    1.000000   LINE AMP =    1.391251
I-POW =    0.000000   LINE POW =    1.191564

C-AMP =    1.000000   LINE AMP =    2.345318
C-POW =    0.000000   LINE POW =    2.186194

C-AMP =    3.020000   LINE AMP =    3.003474
C-POW =    0.000000   LINE POW =    2.808456

C-AMP =    3.000000   LINE AMP =    3.183994
C-POW =    0.000000   LINE POW =    3.005445

C-AMP =    1.000000   LINE AMP =    1.057235
C-POW =    0.000000   LINE POW =    0.994581

          OVER LOAD =    1
 25.000000  -10.000000    0.000000
-10.000000   35.321087  -15.321080
  0.000000  -15.321080   25.831467
 29.042465    5.349889  -15.346879
  1.303183    0.353711   -0.384323

YSER =    0.000 +J  -6.913

YSHT =    0.000 +J   0.000

YSER =    0.000 +J -15.908

YSHT =    0.000 +J   0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   1.360120
C-POW =   3.000000  LINE POW =   1.009365

C-AMP =   3.000000  LINE AMP =   2.829545
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.554852

C-AMP =   3.000000  LINE AMP =   3.284573
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.990657

C-AMP =   3.200000  LINE AMP =   2.690937
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.454554

C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   1.694939
C-POW =   2.000000  LINE POW =   1.545442

          OVER LOAD =   1
 25.000000  -10.000000    0.000000
-10.000000   35.907722  -15.907715
  0.000000  -15.907715   22.820827
 29.953556    2.685129  -11.001704
  1.332589    0.336117   -0.247794

YSER =   0.000 +J -10.482
YSHT =   0.000 +J   0.000

YSER =   0.000 +J -15.455
YSHT =   0.000 +J   0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   1.390021
C-POW =   3.000000  LINE POW =   1.189501

C-AMP =   3.000000  LINE AMP =   2.349725
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.190036

C-AMP =   3.020000  LINE AMP =   3.006117
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.810523

C-AMP =   3.200000  LINE AMP =   3.178237
C-POW =   3.000000  LINE POW =   2.999533

C-AMP =   2.000000  LINE AMP =   1.063665
C-POW =   2.000000  LINE POW =   1.000489

    OVER LOAD =   0

BASE MVA                          100.00000

SAVETY FACTOR                       3.00

ACCELERATION FACTOR                30.00000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลลัพธ์จากการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.000 +J 6.667	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	6.0
2	1 : 3	0.001 +J 10.000	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	9.0
3	2 : 3	0.001 +J 10.000	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	9.1
4	1 : 4	0.000 +J 9.540	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	9.6
5	3 : 4	0.000 +J 6.470	0.000 +J 0.000	100.0	600.0	6.0

ตารางที่ 4.3 แสดงสายส่งชุดใหม่ที่คำนวณได้ในรูปของอิมพีแดนซ์

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.000 +J 0.067	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	6.0
2	1 : 3	0.000 +J 0.100	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	9.0
3	2 : 3	0.000 +J 0.100	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	9.1
4	1 : 4	0.000 +J 0.095	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	9.6
5	3 : 4	0.000 +J 0.065	0.000 +J 0.000	100.0	6.0	6.0

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลของสายในระบบต่อหน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	1	2	3	4
1	0.0020 -35.4824J	-0.0010 15.0000J	-0.0010 10.0000J	-0.0000 10.4824J
2	-0.0010 15.0000J	0.0020 -25.0000J	-0.0010 10.0000J	0.0000 0.0000J
3	-0.0010 10.0000J	-0.0010 10.0000J	0.0020 -35.4550J	-0.0000 15.4550J
4	-0.0000 10.4824J	0.0000 0.0000J	-0.0000 15.4550J	0.0000 -25.9374J
5				

ตารางที่ 4.5 บัสแอดมิแตนซ์เมทริกซ์ของสายส่งที่คำนวณได้

BUS NO.	VOLT		ANGLE	GENERATION		DEMAND	
	PU.	KV	(DEGREE)	MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0000	100.00	0.0000	400.02	262.13	0.00	0.00
2	0.9553	95.53	4.7614	400.00	0.00	0.00	0.00
3	0.9407	94.07	-13.4624	0.00	0.00	400.00	0.00
4	0.9442	94.42	-17.6422	0.00	0.00	400.00	0.00

ตารางที่ 4.6 สภาวะที่บัสจากโหลดโฟลว์และสายส่งที่คำนวณได้

LINE NO.	FROM BUS P	TO BUS Q	FLOW FROM P MW	FLOW FROM P MVAR	FLOW TO Q MW	FLOW TO Q MVAR	LOSS MW	LOSS MVAR
1	1	2	-118.94	71.93	118.95	-59.05	0.00	12.88
2	1	3	219.01	85.13	-219.00	-29.92	0.01	55.21
3	2	3	281.05	59.05	-281.04	31.32	0.01	27.73
4	1	4	299.95	105.07	-299.95	-8.71	0.00	96.36
5	3	4	100.05	-1.40	-100.05	8.72	0.00	7.32

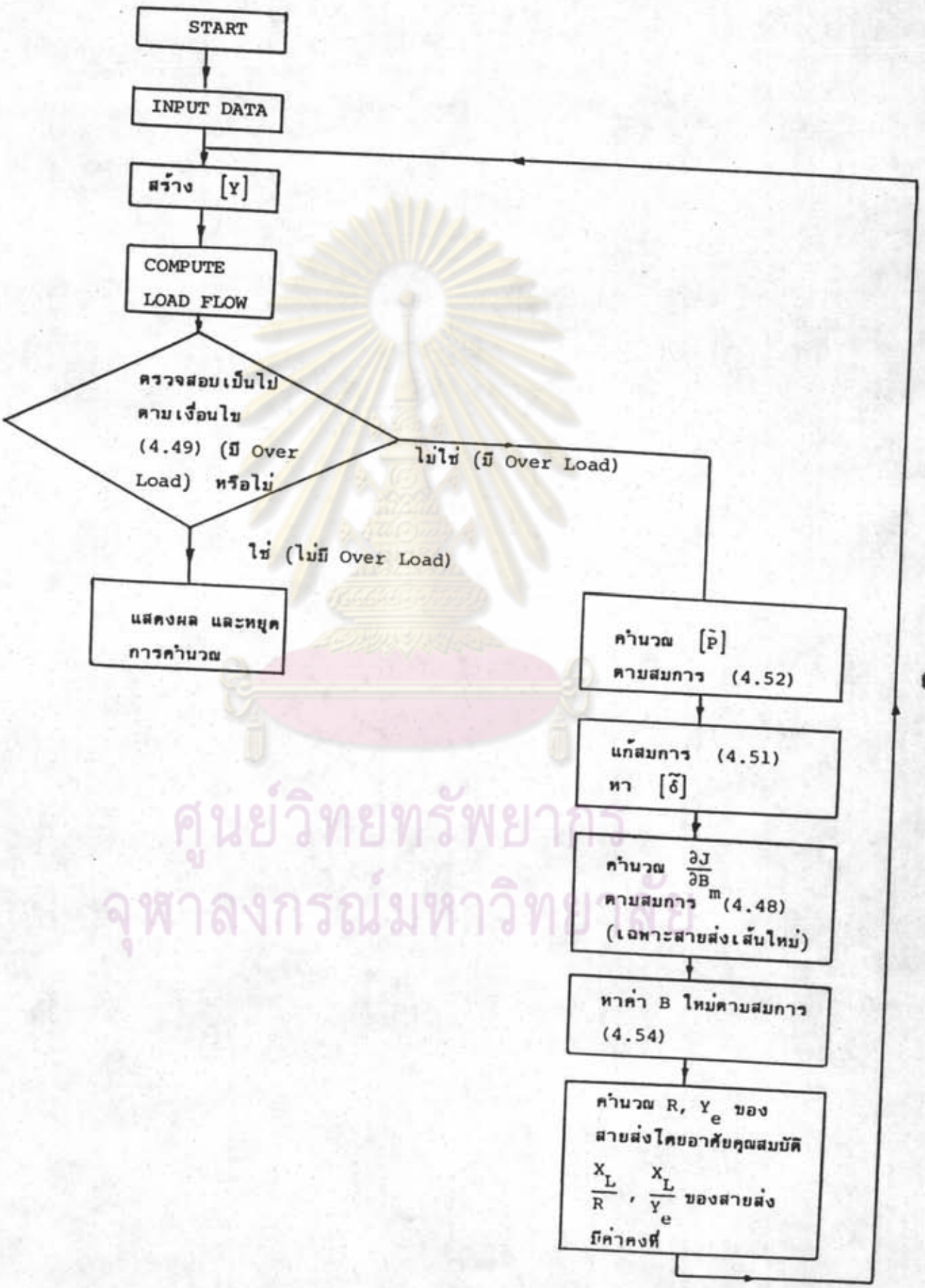
ตารางที่ 4.7 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

	MW	MVAR
GENERATION	[illegible]	[illegible]
LOAD	800.00	[illegible]
LINE CHARGING	0.00	0.00
STATIC CAPACITOR	0.00	0.00
LOSSES	0.02	199.50
MISMATCH	0.00	62.63

ตารางที่ 4.8 ผลสรุปของระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไฟลว์ชาร์ทของวิธี DC Power-Flow โดยใช้ Adjoint Network



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4 <u>การปรับปรุงวิธีหาความไวของเนทเวอค</u> (Modified Network Sensitivity)

จากหัวข้อ 4.2 สมการ (4.20) เงื่อนไขของการออกแบบจะใช้เวคเตอร์ความผิดพลาดกำลังสอง J ซึ่งนิยามดังนี้

$$J_m = \frac{1}{2}(P_m - C_m)^2 \qquad (4.57)$$

สมการ (4.57) เขียนในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} (P_1 - C_1)^2 \\ \vdots \\ (P_n - C_n)^2 \end{bmatrix} \qquad (4.58)$$

n แทน จำนวนสายส่งทั้งหมด

หาค่า $\frac{\partial J_m}{\partial B_m}$ โดยตรงจากสมการ (4.57) ได้

$$\frac{\partial J}{\partial B_m} = (P_m - C_m)\frac{\partial P_m}{\partial B_m} \qquad (4.59)$$

เนื่องจาก

$$P_m = |V_i V_j|\sin(\delta_i - \delta_j)B_m \qquad (4.60)$$

ดังนั้นค่า $\frac{\partial P_m}{\partial B_m}$ สามารถหาได้จากสมการ (4.60) เป็น

$$\frac{\partial P_m}{\partial B_m} = |V_i V_j|\sin(\delta_i - \delta_j) \qquad (4.61)$$

สมการ (4.59) และ (4.61) แสดงถึงความไวของเนทเวอคสามารถหาได้โดยตรงจากข้อมูลที่ได้จากโหลดโฟลว์โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านแอดจอยส์เนทเวอค คำตอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับวิธีใช้แอดจอยส์เนทเวอค แต่ใช้จำนวนรอบและเวลาคำนวณในแต่ละรอบน้อยกว่ากันมาก ดังแสดงในตัวอย่างที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีของรูปที่ 4.2 หาขนาดสายส่ง L_4 และ L_5 โดยวิธีในหัวข้อ 4.3.4 เลือกใช้โหลดโฟลว์โดยวิธีโพล่า ไค-ออร์คิเนค

รายละเอียดการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้

```
C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.385110
C-POW =    3.000000  LINE POW =    1.172725

C-AMP =    3.000000  LINE AMP =    2.393516
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.223916

C-AMP =    3.020000  LINE AMP =    3.031363
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.827264

C-AMP =    3.200000  LINE AMP =    3.135013
C-POW =    3.000000  LINE POW =    2.949054

C-AMP =    2.000000  LINE AMP =    1.120259
C-POW =    2.000000  LINE POW =    1.051047

          OVER LOAD =    1

YSER =    0.000 +J -10.458

YSHT =    0.000 +J   0.000

YSER =    0.000 +J -16.997

YSHT =    0.000 +J   0.000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C-AMP = 2.000000 LINE AMP = 1.381285
C-POW = 3.000000 LINE POW = 1.178474

C-AMP = 3.000000 LINE AMP = 2.369500
C-POW = 3.000000 LINE POW = 2.209294

C-AMP = 3.020000 LINE AMP = 3.018444
C-POW = 3.000000 LINE POW = 2.821526

C-AMP = 3.200000 LINE AMP = 3.146143
C-POW = 3.000000 LINE POW = 2.969329

C-AMP = 2.000000 LINE AMP = 1.095978
C-POW = 2.000000 LINE POW = 1.030671

OVER LOAD = 0

BASE MVA 100.00000

SAVETY FACTOR 3.00

ACCELERATION FACTOR 30.00000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.000 +J 6.667	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	6.0
2	1 : 3	0.001 +J 10.000	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	9.0
3	2 : 3	0.001 +J 10.000	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	9.1
4	1 : 4	0.000 +J 9.562	0.000 +J 0.000	100.0	900.0	9.6
5	3 : 4	0.000 +J 5.883	0.000 +J 0.000	100.0	600.0	6.0

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลสายส่งในรูปของอิมพีแดนซ์และแรงดัน

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.000 +J 0.067	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	6.0
2	1 : 3	0.000 +J 0.100	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	9.0
3	2 : 3	0.000 +J 0.100	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	9.1
4	1 : 4	0.000 +J 0.096	0.000 +J 0.000	100.0	9.0	9.6
5	3 : 4	0.000 +J 0.059	0.000 +J 0.000	100.0	6.0	6.0

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลสายส่งในระบบต่อหน่วย

1:1	2	3	4	
	0.0020:	-0.0010:	-0.0010:	-0.0000:
	-35.4584J:	15.0000J:	10.0000J:	10.4584J:
2:1	2	3	4	
	-0.0010:	0.0020:	-0.0010:	0.0000:
	15.0000J:	-25.0000J:	10.0000J:	0.0000J:
3:1	2	3	4	
	-0.0010:	-0.0010:	0.0020:	-0.0000:
	10.0000J:	10.0000J:	-36.9969J:	16.9969J:
4:1	2	3	4	
	-0.0000:	0.0000:	-0.0000:	0.0000:
	10.4584J:	0.0000J:	16.9969J:	-27.4553J:
5:1	2	3	4	

ตารางที่ 4.11 บัสแอดมิแตนซ์เมทริกซ์

BUS NO.	VOLT		ANGLE	GENERATION		DEMAND	
	P.U.	KV	(DEGREE)	MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0000	100.00	0.0000	400.02	261.69	0.00	0.00
2	0.9552	95.52	4.7180	400.00	0.00	0.00	0.00
3	0.9406	94.06	-13.5835	0.00	0.00	400.00	0.00
4	0.9443	94.43	-17.4981	0.00	0.00	400.00	0.00

ตารางที่ 4.12 สภาวะที่บัสจากโหลดโฟลว์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LINE NO.	FROM BUS P	TO BUS Q	FLOW FROM P MW	FLOW FROM P MVAR	FLOW TO Q MW	FLOW TO Q MVAR	LOSS MW	LOSS MVAR
1	1	2	-117.85	72.05	117.85	-59.33	0.00	12.72
2	1	3	220.93	85.65	-220.92	-29.50	0.01	56.15
3	2	3	282.15	59.33	-282.14	31.78	0.01	27.56
4	1	4	296.93	103.99	-296.93	-9.34	0.00	94.64
5	3	4	103.07	-2.27	-103.07	9.34	0.00	7.07

ตารางที่ 4.13 การไหลของกำลังไฟฟ้า

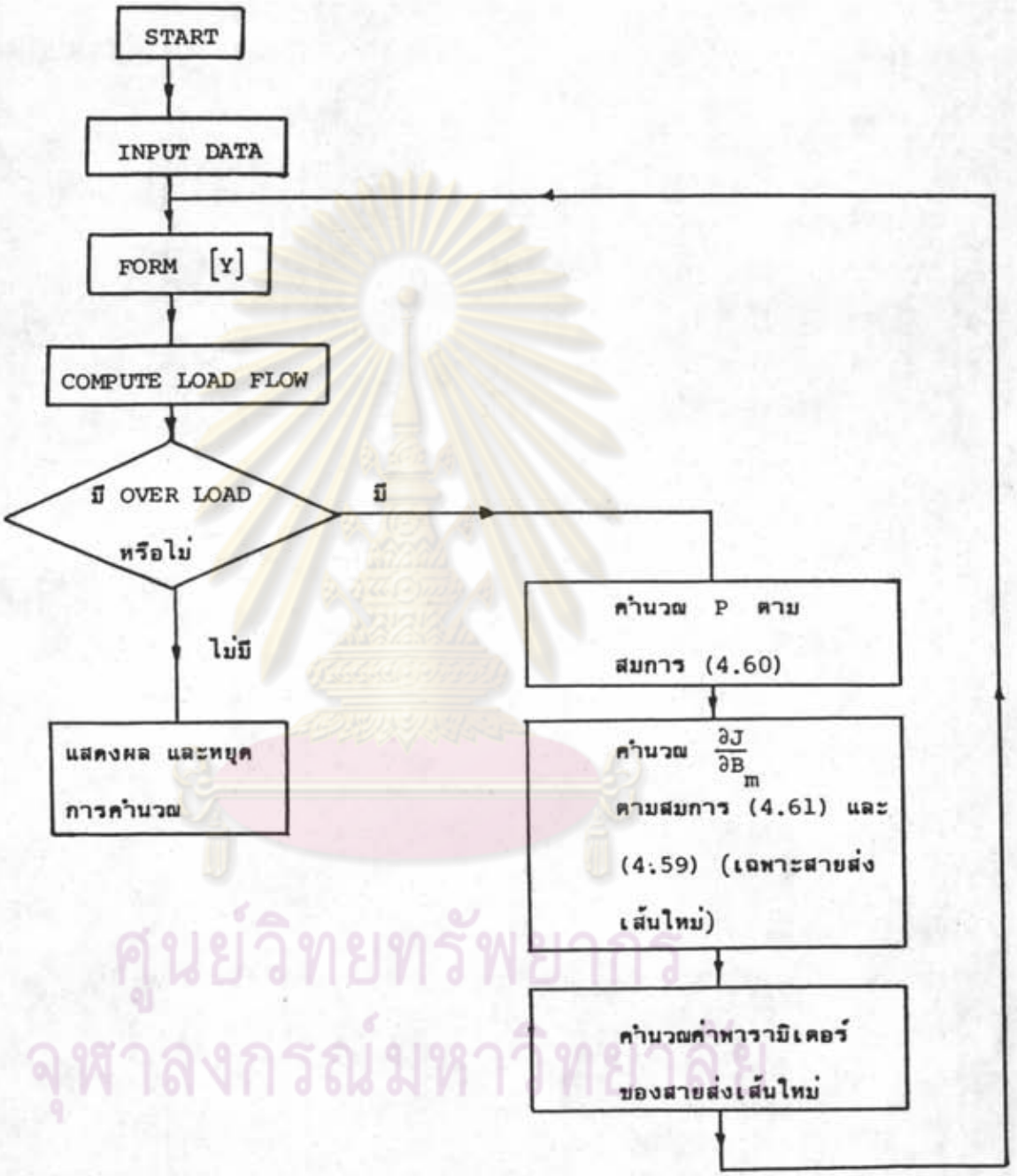
SYSTEM TOTAL

	MW	MVAR
GENERATION	800.02	261.69
LOAD	800.00	0.00
LINE CHARGING	0.00	0.00
STATIC CAPACITOR	0.00	0.00
LOSSES	0.02	198.13
MISMATCH	0.00	63.55

ตารางที่ 4.14 ผลสรุปของระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไฟลว์ชาร์ทของวิธี DC Power-Flow ปรับปรุงความไวของเนทเวอค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณี ระบบไฟฟ้ากำลังตามรูปที่ 4.3 ถ้า L_1 และ L_2 เป็นสายส่งเส้นใหม่ที่ต้องการหาค่าสภาวะต่างๆ ที่บัสกำหนดตามตารางที่ 4.15 กำหนดค่าสายส่งเริ่มต้นตามตาราง ที่ 4.16 ใช้วิธีคำนวณความไวของเนทเวอคตามหัวข้อ 4.3.4 เลือกใช้โหลดโฟลว์วิธีฟาสดีคอปเปิล โดยใช้แฟคเตอร์ความปลอดภัย 300 %

ก. ตัวเร่ง 5.0

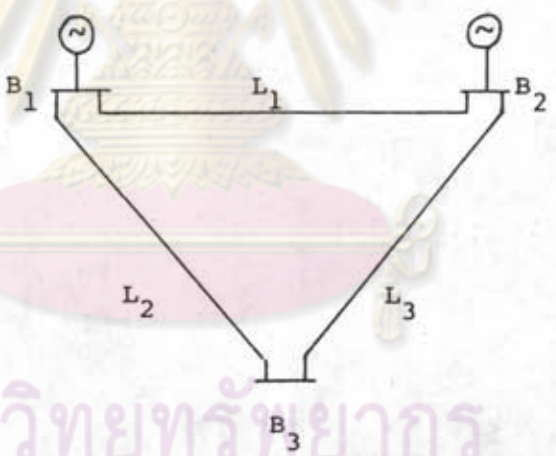
ข. ตัวเร่ง 10.0

ค. ตัวเร่ง 15.0

ง. ตัวเร่ง 20.0

จ. ตัวเร่ง 25.0

ฉ. ตัวเร่ง 30.0



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส 3 ไลน์ L_2 และ L_3 เป็นสายส่งเส้นใหม่

BUS	TYPE	GEN		LOAD		VSPEC (PU)	KV
		MW	MVAR	MW	MVAR		
1	3	----	----	00,0	00,0	1,04	10,0
2	2	5,0	----	10,0	7,0	1,00	10,0
3	1	00,0	00,0	25,0	15,0	1,00	10,0

ตารางที่ 4.15 สภาวะเริ่มต้นที่บัสต่างๆ

LINE	BUS S-E	IMPEDANCE	LINE CHARGING	MAX KAMP	MAX MW
1	1-2	0.04 + J 0.16	0.00 + J 0.15	6.0	45.0
2	1-3	0.02 + J 0.08	0.00 + J 0.07	7.5	60.0
3	2-3	0.03 + J 0.10	0.00 + J 0.04	3.0	30.0

ตารางที่ 4.16 สภาวะเริ่มต้นของสายส่ง

ผลการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้

ก. ตัวเร่ง 5.0

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.250 +J 1.000	0.000 +J 0.009	10.0	45.0	6.0
2	1 : 3	0.217 +J 0.867	0.000 +J 0.008	10.0	60.0	7.5
3	2 : 3	0.300 +J 1.000	0.000 +J 0.004	10.0	30.0	3.0

ตารางที่ 4.17 ข้อมูลของสายส่งในรูปของอิมพิแดนซ์

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.025 +J 0.100	0.000 +J 0.090	10.0	4.5	6.0
2	1 : 3	0.022 +J 0.087	0.000 +J 0.078	10.0	6.0	7.5
3	2 : 3	0.030 +J 0.100	0.000 +J 0.040	10.0	3.0	3.0

ตารางที่ 4.18 ข้อมูลสายส่งในระบบต่อหน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ตัวเร่ง 10.0

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.253 +J 1.017	0.000 +J 0.009	10.0	45.0	6.0
2	1 : 3	0.218 +J 0.871	0.000 +J 0.008	10.0	60.0	7.5
3	2 : 3	0.300 +J 1.000	0.000 +J 0.004	10.0	30.0	3.0

ตารางที่ 4.19 ข้อมูลสายส่งในรูปของอิมพีแดนซ์

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.025 +J 0.101	0.000 +J 0.091	10.0	4.5	6.0
2	1 : 3	0.022 +J 0.087	0.000 +J 0.078	10.0	6.0	7.5
3	2 : 3	0.030 +J 0.100	0.000 +J 0.040	10.0	3.0	3.0

ตารางที่ 4.20 ข้อมูลสายส่งในระบบต่อหน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. ตัวเร่ง 15.0

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.202 +J 0.806	0.000 +J 0.007	10.0	45.0	6.0
2	1 : 3	0.210 +J 0.841	0.000 +J 0.008	10.0	60.0	7.5
3	2 : 3	0.300 +J 1.000	0.000 +J 0.004	10.0	30.0	3.0

ตารางที่ 4.21 ข้อมูลสายส่งในรูบอิมพิแดนซ์

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.020 +J 0.081	0.000 +J 0.077	10.0	4.5	6.0
2	1 : 3	0.071 +J 0.084	0.000 +J 0.076	10.0	6.0	7.5
3	2 : 3	0.030 +J 0.100	0.000 +J 0.040	10.0	3.0	3.0

ตารางที่ 4.22 ข้อมูลสายส่งในระบบต่อหน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. ตัวเร่ง 20.0

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.190 +J 0.762	0.000 +J 0.007	10.0	45.0	6.0
2	1 : 3	0.206 +J 0.824	0.000 +J 0.007	10.0	60.0	7.5
3	2 : 3	0.300 +J 1.000	0.000 +J 0.004	10.0	30.0	3.0

ตารางที่ 4.23 ข้อมูลสายส่งในรูปอิมพีแดนซ์

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.019 +J 0.076	0.000 +J 0.068	10.0	4.5	6.0
2	1 : 3	0.071 +J 0.082	0.000 +J 0.074	10.0	6.0	7.5
3	2 : 3	0.030 +J 0.100	0.000 +J 0.040	10.0	3.0	3.0

ตารางที่ 4.24 ข้อมูลสายส่งในระบบต่อหน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ. ตัวเร่าง 25.0

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.193	0.000	10.0	45.0	6.0
		+J 0.773	+J 0.007			
2	1 : 3	0.208	0.000	10.0	60.0	7.5
		+J 0.833	+J 0.007			
3	2 : 3	0.300	0.000	10.0	30.0	3.0
		+J 1.000	+J 0.004			

ตารางที่ 4.25 ข้อมูลสายส่งในรูปอิมพีแดนซ์

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.019	0.000	10.0	4.5	6.0
		+J 0.077	+J 0.070			
2	1 : 3	0.021	0.000	10.0	6.0	7.5
		+J 0.083	+J 0.075			
3	2 : 3	0.030	0.000	10.0	3.0	3.0
		+J 0.100	+J 0.040			

ตารางที่ 4.26 ข้อมูลสายส่งในระบบต่อหน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉ. ตัวเร่ง 30.0

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.182 +J 0.727	0.000 +J 0.007	10.0	45.0	6.0
2	1 : 3	0.703 +J 0.811	0.000 +J 0.007	10.0	60.0	7.5
3	2 : 3	0.300 +J 1.000	0.000 +J 0.004	10.0	30.0	3.0

ตัวอย่างที่ 4.27 ข้อมูลสายส่งในรูปอิมพีแดนซ์

LINE	BUS CODE P-Q	SERIES IMPEDANCE	LINE CHARGING	VOLT (KV)	MAX POWER	MAX (KAMP)
1	1 : 2	0.018 +J 0.073	0.000 +J 0.065	10.0	4.5	6.0
2	1 : 3	0.070 +J 0.081	0.000 +J 0.073	10.0	6.0	7.5
3	2 : 3	0.030 +J 0.100	0.000 +J 0.040	10.0	3.0	3.0

ตัวอย่างที่ 4.28 ข้อมูลสายส่งในระบบต่อหน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย