บทที่ 4
การวิเคราะห์หาจุดวิกฤติในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง

เนื่องจากในปัจจุบันมีวิธีที่ใช้ในคำนวณหาจุดวิกฤติในระบบไฟฟ้ากำลังอยู่หลายวิธี เช่น วิธีโหลดโฟลว์แบบธรรมดา [1] วิธีออปติไมซ์เซชั่น [8] หรือวิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง [4] ซึ่งการตัดสินใจจะเลือกวิธีการใดในการคำนวณนั้นขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้ ทั้งนี้เพราะแต่ละวิธีก็ต่างมีข้อเด่นและข้อด้อยของตนเองดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์เล่มนี้สนใจในด้านความรวดเร็วในการคำนวณในขณะที่ผลการวิเคราะห์ที่ได้ ยังมีความแม่นยำในการคำนวณไม่น้อยกว่าวิธีเดิม ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถทำการพัฒนาต่อเนื่องและนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงแบบ on-line ได้ ดังนั้นจะทำการศึกษาถึงจุดวิกฤติของระบบโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง โดยพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในสถานการณ์ที่แตกต่างกันไป ดังต่อไปนี้

1. ระบบปกติไม่มีการชดเชยแรงดัน
2.ระบบที่มีการชดเชยแรงดันด้วยหม้อแปลงเปลี่ยนอัตราทดรอบ
3.ระบบที่มีการชดเชยแรงดันด้วยการต่อตัวเก็บประจุชดเชยกำลังรีแอคทีฟแบบอนุกรม
4.ระบบที่มีการชดเชยแรงดันด้วยการตัวเก็บประจุชดเชยกำลังรีแอคทีฟแบบขนาน

โดยในการคำนวณจะมีการใช้ตัวปรับค่าความกว้างของช่วงการทำนาย (δ) โดยอัตโนมัติตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เพื่อทำให้การทำงานของโปรแกรมรวดเร็วขึ้น โดยมีการกำหนดขอบเขตความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเอาไว้ที่กำลังจริงขนาด 1.0 P.U. ก่อนถึงขนาดของกำลังจริงที่ต้องจ่ายให้กับโหลดที่จุดวิกฤติซึ่งเป็นจุดที่ระบบกำลังจะมีปัญหาการพังทลายของแรงดันเพื่อแจ้งเตือนแก่ผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์ปฏิบัติการให้ป้องกันการเกิดการพังทลายของแรงดัน สามารถหาค่าบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบได้โดยอัตโนมัติ รวมทั้งสามารถแสดงผลที่เกิดขึ้นกับระดับแรงดันของระบบ อันเกิดจากการชดเชยแรงดันด้วยวิธีต่าง ๆ ได้ ซึ่งในบทนี้จะได้แสดงตัวอย่างการคำนวณง่าย ๆโดยใช้ระบบทดสอบขนาด 5 บัส (5 Bus Test Data) ซึ่งจะสามารถแสดงวิธีการวิเคราะห์คำตอบโดยละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ข้อมูลซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบ

ข้อมูลของระบบที่จะนำมาวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของจะประกอบไปด้วยข้อมูลย่อยๆในแต่ละส่วนของระบบได้แก่ ข้อมูลบัส ข้อมูลสายส่ง ข้อมูลหม้อแปลง และข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับระบบทดสอบ (ถ้ามี) ดังแสดงต่อไปนี้

4.1.1 ข้อมูลบัส

ประกอบไปด้วยแรงดันบัส มุมเฟสของแต่ละบัส (ค่าแรกที่เริ่มใช้ในการคำนวณคือค่าที่ได้ จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมโหลดโฟลว์แบบธรรมดา) ชนิดของบัส กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาในกรณีบัสนั้นมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ และกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับโหลดในกรณีของบัสที่มีโหลดต่ออยู่

ในกรณีที่มีการชดเชยแรงดันโดยการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัสใดบัสหนึ่งจะมีผลทำให้ค่ากำลังรีแอคทีฟที่เกิดจากโหลด ณ บัสที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานนั้นมีค่าลดลงเนื่องจากผลของการชดเชยกำลังรีแอคทีฟของตัวเก็บประจุแบบขนานดังแสดงตามสมการที่ (4.1)

$$Q' = Q_L - Q_C \qquad (4.1)$$

โดยที่ Q_L = กำลังรีแอคทีฟที่เกิดจากโหลด

Q_C = กำลังรีแอคทีฟที่เกิดจากตัวเก็บประจุแบบขนาน

Q' = กำลังรีแอคทีฟสุทธิ

โดยระบบทดสอบตัวอย่างขนาด 5 บัส มีข้อมูลของบัสดังแสดงตามตารางที่ 4.1 และเมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานขนาด 20 KVAR (0.2 P.U.) เข้าไปที่บัส 4 ของระบบทดสอบแบบ 5 บัส [1] ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรีแอคทีฟที่บัสดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยแสดง การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรีแอคทีฟเนื่องจากอุปกรณ์ชดเชยแรงดันดังกล่าวไว้ในตารางที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลของบัสต่างๆในระบบทดสอบขนาด 5 บัส

	Generation		Load			
Bus	**P MW**	**Q**	**P MW**	**Q**	**V(PU.)**	**Remarks**
1	.....	Mvar	65	Mvar	.04∠0	Swing Bus
2	0	0	115	60	.00∠0	Load Bus
3	180	.....	70	40	.02∠0	Voltage constant Bus
4	0	0	70	30/*10***	.00∠0	Load Bus
5	0	0	85	40	.00∠0	Load Bus

** ค่าที่แสดงด้วยตัวเอียงแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิที่เกิดจากการติดตั้งตังเก็บประจุแบบขนาน

นอกจากผลที่เกิดขึ้นกับกำลังไฟฟ้าแล้ว การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานจะทำให้ค่าของแอตมิตแตนซ์ ณ บัสที่มีการติดตั้งเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังแสดงไว้ในหัวข้อของการคำนวณหาค่า บัสแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์ ต่อไป

4.1.2 ข้อมูลสายส่ง

ข้อมูลของสายส่งที่แสดงประกอบไปด้วยค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่งแต่ละช่วง เมื่อนำมาคำนวณจริงจะต้องแปลงค่าให้อยู่ในรูปของแอตมิตแตนซ์เสียก่อน ค่า Half Line Charging Susceptance ในหน่วยเปอร์ยูนิต (P.U.) รวม ทั้งค่าแอตมิตแตนซ์ของหม้อแปลงที่มีการแปลงให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลย์แล้ว ซึ่งจะนำมาใช้ในการหาค่า บัสแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus Admittance Matrix) ณ ตำแหน่งตามแนวทแยง (Diagonal)

การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายใดสายหนึ่งมีผลต่อค่าแอตมิตแตนซ์ของสายส่ง คือ การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมทำให้ค่าแอตมิตแตนซ์ของสายส่งลดลง ซึ่งมีผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าไปสู่โหลดทำได้ดีขึ้น และแรงดันตกคร่อมในสายส่งก็จะลดลงด้วย

ในทำนองเดียวกันกับการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมขนาด 0.0001 ฟารัด ระหว่างบัสที่ 4 กับบัสที่ 5 ของระบบทดสอบแบบ 5 บัส จะได้ค่าเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงตามตารางที่ 4.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลของสายส่งในระบบทดสอบขนาด 5 บัส

Line No.	Between Bus	R (PU)	X (PU)	Halfline Charging susceptance (PU)
1	1-2	0.042	0.168	4.1
2	1-5	0.031	0.126	3.1
3	2-3	0.031	0.126	3.1
4	3-4	0.084	0.336	8.2
5	3-5	0.053	0.210	5.1
6	4-5	0.063	0.252/*0.0844***	6.1

** ค่าที่แสดงด้วยตัวเอียงแสดงถึงค่าองค์ประกอบของสายส่งสุทธิที่เกิดจากการติดตั้งตังเก็บประจุแบบอนุกรม

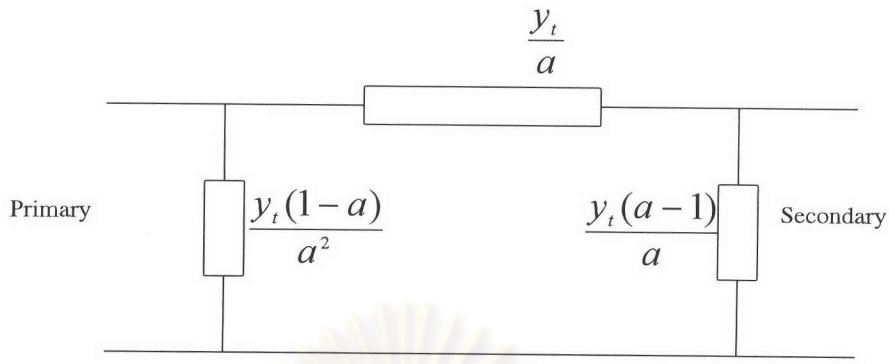
4.1.3 ข้อมูลหม้อแปลง

การติดตั้งหม้อแปลงที่มีการตั้งอัตราส่วนแรงดันระหว่างทางด้านปฐมภูมิ (Primary) กับ ด้านทุติยภูมิ (Secondary) เท่ากับ a เอาไว้ที่สายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งนั้น จะมีผลทำให้ค่าแอตมิตแตนซ์ของสายส่งเส้นนั้นเปลี่ยนไปมีค่าเท่ากับ

$$y' = \frac{y}{a} \qquad (4.2)$$

เมื่อ y คือค่าแอตมิตแตนซ์เดิมของสายส่ง

อีกทั้งเมื่อทำการแปลงรูปแบบของวงจรจากวงจรเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) เป็นวงจรสมมูลย์แบบ π (π - Equivalent Circuit) จะทำให้มีค่าตัวแปรบางตัวเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ มีค่าแอตมิตแตนซ์ที่ต่อลงดิน ($y_{Charging-ground}$) และวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไปดัง แสดงตามรูปที่ 4.1 สมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.4) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงปรับค่าได้

ซึ่งจะได้แอตมิตแตนซ์ทางด้านปฐมภูมิ $= \frac{y_t(1-a)}{a^2}$ (4.3)

และได้แอตมิตแตนซ์ทางด้านทุติยภูมิ $= \frac{y_t(a-1)}{a}$ (4.4)

4.2 การคำนวณค่าบัสแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Y bus)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าในบัสแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์ จากค่าแอตมิตแตนซ์ระหว่างบัส และค่าแอตมิตแตนซ์ที่ต่อลงสู่กราวน์ซึ่งรู้ค่าอยู่แล้ว โดยในการคำนวณจะแบ่งค่าของเมตริกซ์ออกเป็นค่าที่อยู่ตามแนวทแยงหลักของเมตริกซ์ (Diagonal Elment) และค่าที่ไม่ได้อยู่ตามแนวทแยงหลัก (Off - Diagonal Element) ซึ่งค่าของสมาชิก ณ ตำแหน่ง ต่าง ๆ ดังกล่าวสามารถหาค่าได้ดังนี้

4.2.1 สมาชิกที่ไม่ได้อยู่ตามแนวทแยงหลัก

$$Y_{i,j} = y_{ij} \qquad (4.5)$$

โดยที่ y_{ij} ได้มาจากการกลับอิมพิแดนซ์ให้เป็นแอตมิตแตนซ์

$Y_{i,j}$ เป็นค่าแถวที่ I หลักที่ j ของบัสแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์

4.2.2 สมาชิกที่อยู่ตามแนวทแยง

$$Y_{i,j} = -\sum_{i,j=1}^{N} y_{ij} + y_{Charging-ground} + y_{Shunt-C} \qquad (4.6)$$

เมื่อ

$y_{Shunt-C}$ คือค่าแอตมิตแตนซ์ที่ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าไประหว่างบัสที่พิจารณากับกราวน์

$y_{Charging-ground}$ คือค่าแอตมิตแตนซ์ที่เกิดการเหนี่ยวนำของสายส่งเทียบกับกราวน์

ส่วนการติดตั้งอุปกรณ์เสริมหรืออุปกรณ์ชดเชยแรงดันนั้นจะมีผลดังที่กล่าวมาในหัวข้อ ที่ 4.1 กล่าวคือทำให้ค่าในตำแหน่งต่างๆของบัสแอตมิตแตนซ์เปลี่ยน และต้องคำนวณค่าของบัสแอตมิตแตนซ์ใหม่อยู่เรื่อย ๆ แต่ถ้าระหว่างบัสคู่ใดไม่มีสายส่งต่อเชื่อมอยู่ จะทำให้ค่าในบัสแอตมิตแตนซ์ ณ ตำแหน่งระหว่างบัสคู่นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์

4.3 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าอื่น ๆ ในระบบตลอดจนหาคำตอบ

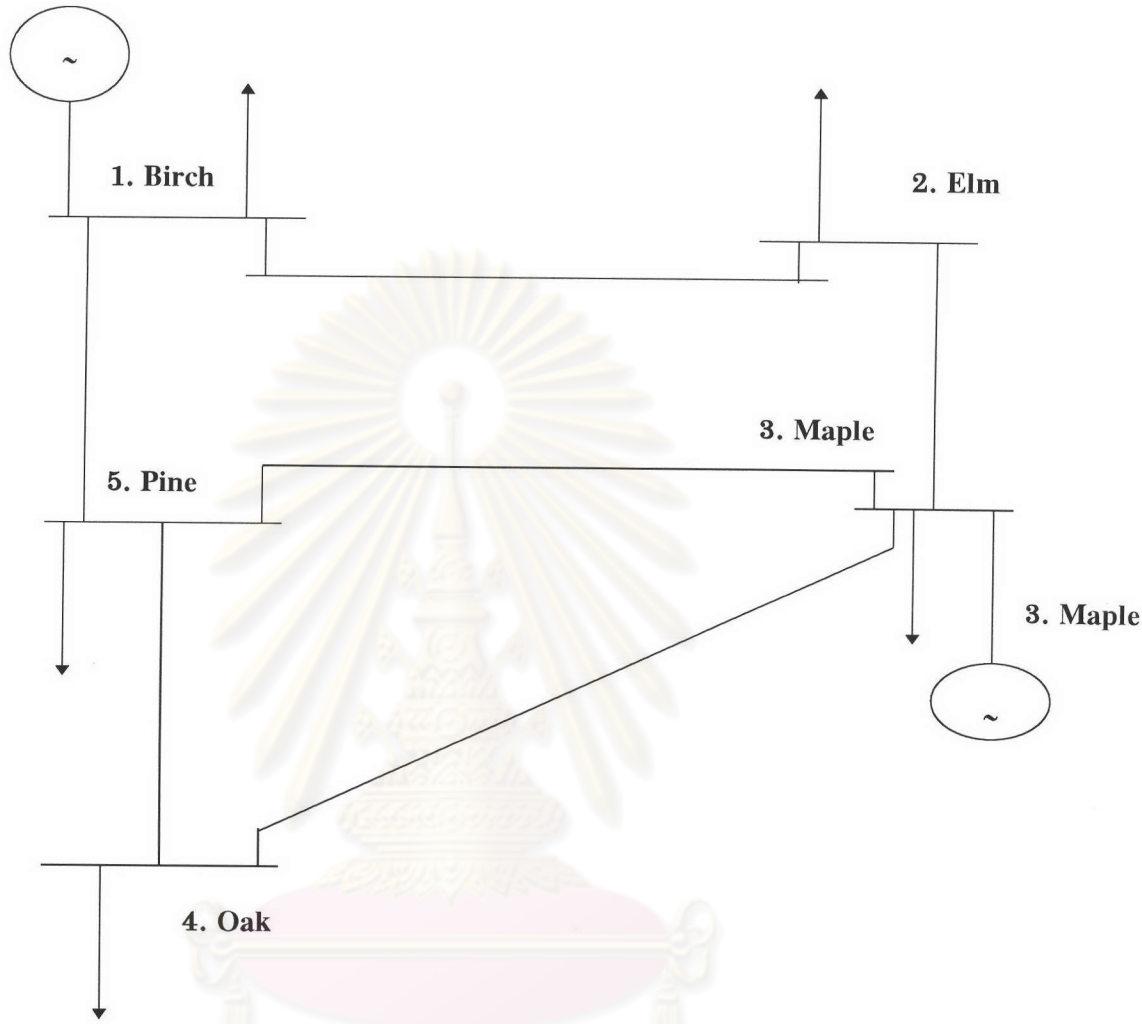
จากสมการที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 และข้อมูลของระบบทดสอบแบบ 5 บัส พบว่าจะสามารถคำนวณหาค่าสมการของกำลังจริง (P) และกำลังรีแอคทีฟ (Q) ได้ทุก ๆ บัส ซึ่งในความเป็นจริงในระบบที่ใหญ่ขึ้นการคำนวณหาสมการของทุก ๆ บัสคงเป็นไปไม่ได้ จึงต้องมีการหาบัสที่อ่อนแอที่สุดมาเป็นตัวแทนของระบบเสียก่อน [4] แต่สำหรับในหัวข้อนี้จะแสดงการคำนวณในบัสที่ 2 เป็นตัวอย่าง โดยสามารถแสดงระบบตัวอย่างขนาด 5 บัส ได้ดังรูปที่ 4.2

โดย ที่บัส 2 จะสามารถแยกเขียนกำลังไฟฟ้าในรูปของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟได้ดังสมการที่ (4.7) และสมการที่ (4.8) ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} P_2 = {} & P_{G20}(1+\lambda K_{G2}) - P_{L20} - \lambda(K_{L2} S_{\Delta Base} \cos\varphi_2) \\ & -V_2 V_1 y_{21} \cos(\delta_2 - \delta_1 - \gamma_{21}) - {}_2^2 \cos(-\gamma_{22}) \\ & -V_2 V_3 y_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3 - \gamma_{23}) \end{aligned} \qquad (4.7)$$

$$\begin{aligned} Q_2 = {} & Q_{G20} - Q_{L20} - \lambda(K_{L2} S_{\Delta Base} \sin\varphi_2) \\ & -V_2 V_1 y_{21} \sin(\delta_2 - \delta_1 - \gamma_{21}) - {}_2^2 \sin(-\gamma_{22}) \\ & -V_2 V_3 y_{23} \sin(\delta_2 - \delta_3 - \gamma_{23}) \end{aligned} \qquad (4.8)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แสดงระบบทดสอบขนาด 5 บัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และเมื่อนำกำลังจริง และกำลังรีแอคทีฟ มาหาค่าอนุพันธ์เทียบกับตัวแปรที่ต้องการหาค่าจากสมการโหลดโฟลว์ จะสามารถสร้างจาร์โคเบียนเมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$\frac{\partial P}{\partial \delta}=V_2V_1y_{21}\sin(\delta_2-\delta_1-\gamma_{21})+V_2V_3y_{23}\sin(\delta_2-\delta_3-\gamma_{23})$$

$$\frac{\partial P}{\partial V}=-V_1y_{21}\cos(\delta_2-\delta_1-\gamma_{21})-2V_2y_{22}\cos(-\gamma_{22})-V_3y_{23}\cos(\delta_2-\delta_3-\gamma_{23})$$

$$\frac{\partial P}{\partial \lambda}=P_{G20}K_{G2}-K_{L2}S_{\Delta base}\cos\varphi_2$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \delta}=-V_2V_1y_{21}\cos(\delta_2-\delta_1-\gamma_{21})+V_2V_3y_{23}\cos(\delta_2-\delta_3-\gamma_{23})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V}=-V_1y_{21}\sin(\delta_2-\delta_1-\gamma_{21})-2V_2y_{22}\sin(-\gamma_{22})-V_3y_{23}\sin(\delta_2-\delta_3-\gamma_{23})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \lambda}=K_{L2}S_{\Delta base}\sin\varphi_2$$

และ

δ_i = มุมเฟสของบัส

P_{Li0} = กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ณ บัส ในสภาวะโหลดฐาน

Q_{Li0} = กำลังรีแอคทีฟที่จ่ายกับโหลด ในสภาวะโหลดฐาน

φ_i = มุมของตัวประกอบกำลัง ณ บัส i

γ_{ij} = มุมของค่าแอตมิตแตนซ์ระหว่างบัส I กับบัส j

จากนั้นใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่องเพื่อหาค่าเมตริกซ์ซึ่งจะนำมารวมกับค่าของเมตริกซ์ของคำตอบเดิมเพื่อทำนายค่าในขั้นตอนถัดไปดังนี้

$$[J]x\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

ค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted Value)

$$\begin{bmatrix} \delta' \\ V' \\ \lambda' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} x(StepSize)$$

โดยที่

Step Size คือค่าคงที่ที่นำมาคูณเพื่อใช้ในการคำนวณหาคำตอบในขั้นถัดไป ซึ่งจากหลักการของวิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่องจะมีการปรับค่าตลอดเวลาแต่ในกรณีของโหลดโฟลว์ธรร รมดาจะมีค่าคงที่ เท่ากับ 0.5 [6,7]

เมื่อได้ค่าดังที่ต้องการแล้วนำมาสู่ขั้นตอนของการแก้ไขค่า ตามสมการต่อไปนี้

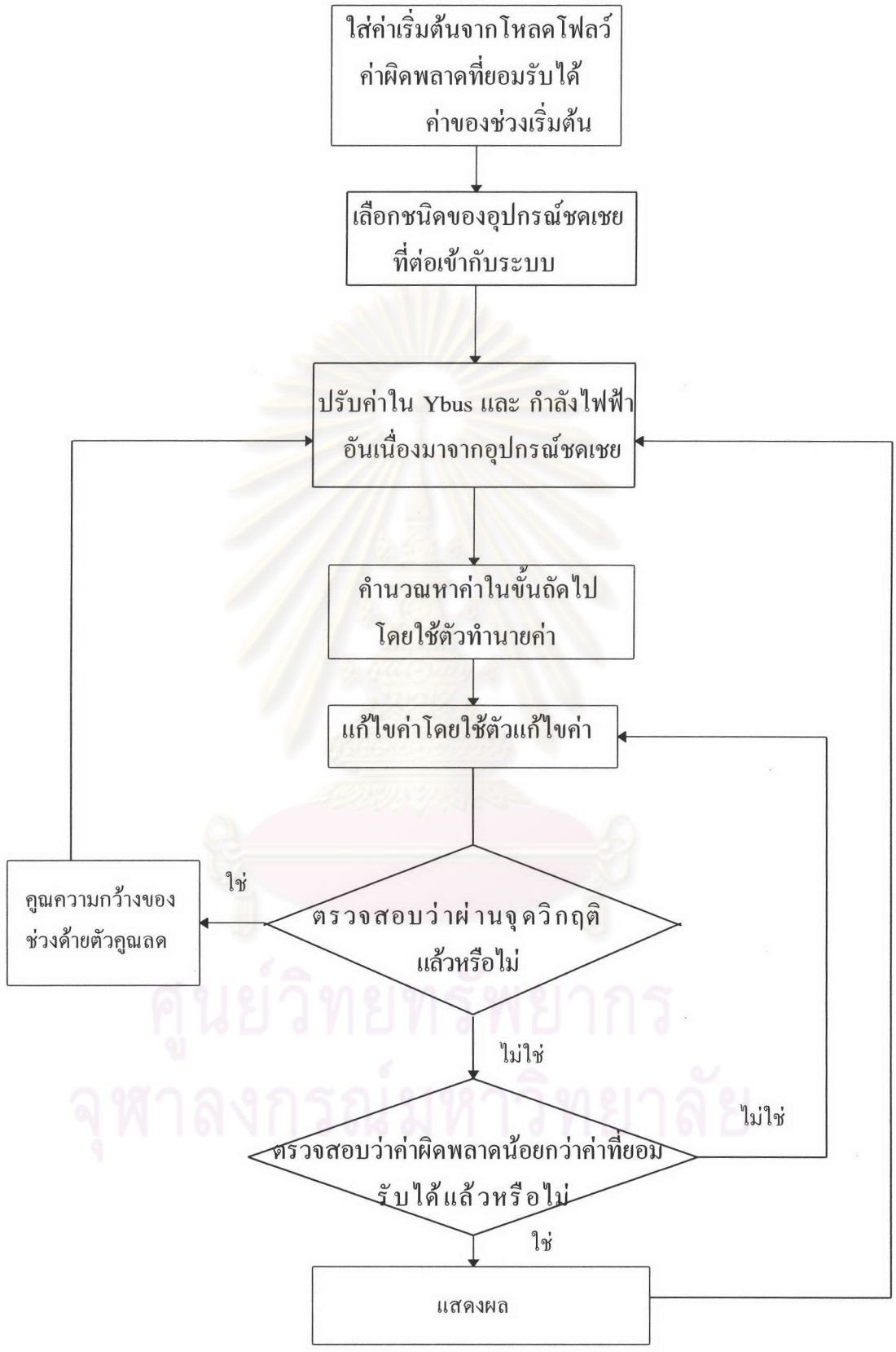
$$-[J^*]x \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(x') \\ Q(x') \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = -[J]^{-1} \begin{bmatrix} P'(x) \\ Q'(x) \\ 0 \end{bmatrix}$$

คำตอบที่ได้จากการแก้สมการดังกล่าวคือค่าผิดพลาดของการคำนวณ ซึ่งเมื่อค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้แล้วจะได้คำตอบในแต่ละรอบของการคำนวณ หรือสรุปเป็นโฟลวชาร์ตได้ดังรูปที่ 4.3

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าขอบเขตปลอดภัย จุดวิกฤติ หรือเพื่อแสดงถึงผลกระทบของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบต่าง ๆ ซึ่งวิธีการได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และผลการคำนวณต่าง ๆ จะได้แสดงในบทต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงวิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย