บทที่ 4
การจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} สำหรับการประเมินความมั่นคงในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากหลักการการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 จะพบว่าเมื่อเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง เราสามารถคำนวณค่าแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งที่เหลือในระบบได้ แต่เนื่องจากว่าเราต้องการแยกแยะเฉพาะเหตุขัดข้องที่มีผลทำให้ระบบเสียหายรุนแรง ออกจากเหตุขัดข้องที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ เพื่อทำให้สามารถลดจำนวนเหตุการณ์ที่ต้องทำการพิจารณาเพิ่มเติมถึงผลจากเหตุขัดข้องเหล่านี้ เช่น การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบ เป็นต้น ดังนั้นเราต้องมีตัวแปรบางอย่างที่ใช้ในการเปรียบเทียบแยกแยะระดับความรุนแรงของเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้น และทำการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องตามระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่าดัชนีสภาวะเป็นตัววัดความรุนแรงที่เกิดขึ้นของเหตุขัดข้องต่างๆ

4.1 ดัชนีสภาวะ (Performance Indices)

การจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} สำหรับการประเมินความมั่นคงในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จะอาศัยการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ร่วมกับค่าดัชนีสภาวะ ซึ่งใช้เป็นตัววัดความรุนแรงที่เกิดขึ้นของเหตุขัดข้องต่างๆ โดยอาศัยค่าแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งหลังเกิดเหตุขัดข้องที่ได้จากการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ในการคำนวณ เพื่อนำค่าดัชนีสภาวะนี้ไปใช้ในการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องตามระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น

ดัชนีสภาวะที่ใช้ในการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องในระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย

- ดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้า (PI_{MW})
- ดัชนีสภาวะแรงดัน (PI_{V})

ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

4.1.1 ดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้า [2] : เป็นตัววัดสภาพของระบบในรูปของ line overloaded คือ

$$PI_{MW} = \sum_{l=1}^{NL} W_l \left(\frac{P_l}{P_l^{lim}} \right)^{2m} \qquad (4.1)$$

PI_{MW} คือ ดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้า

NL คือ จำนวนสายส่งในระบบ

W_l คือ weighting factor ของสายส่งเส้นที่ l

P_l คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลอยู่ในสายส่งเส้นที่ l

P_l^{lim} คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่สามารถไหลผ่านสายส่งเส้นที่ l

m คือ ค่าคงที่เท่ากับ 5 [1]

ดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้า (PI_{MW}) นั้นเป็นการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลอยู่ในสายส่งเส้นใดๆ กับกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่สามารถไหลผ่านสายส่งเส้นนั้นได้ หากเกิดเหตุขัดข้องขึ้นจะพบว่า สายส่งเส้นที่เกิด overloaded จะทำให้อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 ขณะที่สายส่งเส้นที่การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าอยู่ภายในขีดจำกัด (limit) ก็จะทำให้อัตราส่วนมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ดัชนีสภาวะทางด้านกำลังไฟฟ้านี้ สามารถใช้เป็นตัววัดสภาพความรุนแรงของเหตุขัดข้องของระบบในด้าน line overloaded ได้ดี ถ้าค่าดัชนีสภาวะทางด้านกำลังไฟฟ้าสำหรับเหตุขัดข้องใดมีค่ามาก ก็แสดงว่าเหตุขัดข้องนั้นก่อให้เกิดผลเสียหายแก่ระบบมากกว่าเหตุขัดข้องที่มีค่าดัชนีสภาวะทางด้านกำลังไฟฟ้าต่ำ

4.1.2 ดัชนีสภาวะแรงดัน [4] : เป็นตัววัดสภาพของระบบในรูปของการเบี่ยงเบนของแรงดัน (voltage deviation) คือ

$$PI_V = \sum_{n=1}^{NB} W_n \left(\frac{V_n - \overline{V_n}}{\Delta V_n} \right)^{2m} \qquad (4.2)$$

PI_V คือ ดัชนีสภาวะแรงดัน

NB คือ จำนวนบัสในระบบ

W_n คือ weighting factor ของบัสที่ n

V_n คือ แรงดันที่บัสที่ n หลังเกิดเหตุขัดข้อง

$\overline{V}_n$ คือ แรงดันเฉลี่ยที่บัสที่ n ก่อนเกิดเหตุขัดข้อง มีค่าเท่ากับ $\frac{V_{n\,max} + V_{n\,min}}{2}$

ΔV_n คือ การเบี่ยงเบนของแรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ มีค่าเท่ากับ $\frac{V_{n\,max} - V_{n\,min}}{2}$

ดัชนีสภาวะแรงดัน (PI_V) นั้นเป็นการเปรียบเทียบการเบี่ยงเบนของแรงดันที่บัสหลังเกิดเหตุขัดข้อง กับการเบี่ยงเบนของแรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ เมื่อเกิดเหตุขัดข้องขึ้น จะพบว่า บัสใดที่เกิดแรงดันเกินหรือแรงดันตก ก็จะทำให้อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 ขณะที่บัสใดที่แรงดันมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จะทำให้อัตราส่วนมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ดัชนีสภาวะทางด้านแรงดันนี้ สามารถใช้เป็นตัววัดสภาพของระบบในด้านขีดจำกัดด้านแรงดันได้ดี ถ้าค่าดัชนีสภาวะทางด้านแรงดันสำหรับเหตุขัดข้องใดมีค่ามาก ก็แสดงว่าเหตุขัดข้องนั้นก่อให้เกิดผลเสียหายแก่ระบบมากกว่าเหตุขัดข้องที่มีค่าดัชนีสภาวะทางด้านแรงดันต่ำ

จากค่าดัชนีสภาวะทั้งสองตัวดังกล่าว จะเห็นว่า ในการที่จะคำนวณค่าดัชนีดังกล่าวสำหรับเหตุขัดข้องต่างๆ นั้น จำเป็นจะต้องรู้ค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งหลังเกิดเหตุขัดข้อง (สำหรับคำนวณค่าดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้า) และค่าแรงดันที่บัสต่างๆ หลังเกิดเหตุขัดข้อง (สำหรับคำนวณค่าดัชนีสภาวะแรงดัน) ถ้าทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่ก็จะเสียเวลาในการคำนวณมาก แต่ด้วยวิธีการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ดังที่กล่าวในบทที่แล้ว จะทำให้เราสามารถคำนวณค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งหลังเกิดเหตุขัดข้อง และค่าแรงดันที่บัสต่างๆ หลังเกิดเหตุขัดข้อง ได้ในเวลาอันรวดเร็ว ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ในการคำนวณค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าหลังเกิดเหตุขัดข้อง ซึ่งให้ผลตอบในเวลาอันรวดเร็ว ร่วมกับค่าดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้า และ ค่าดัชนีแรงดัน เพื่อทำการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องตามระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น

นอกจากนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} กับการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องที่ใช้ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าหลังเกิดเหตุขัดข้องที่ได้จากการ

คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่ เพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพของการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

4.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปนั้นการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าและกระแสที่จุดต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะการทำงานปกติ (Steady state condition) มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้ผลที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในสายส่ง กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสต่างๆ รวมทั้งกำลังสูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย

4.2.1 สมมติฐานในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

1)ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสมดุล 3 เฟส ที่อยู่ในสภาวะการทำงานปกติ

2)การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์และสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจะยึดบัสเป็นกรอบอ้างอิง (Bus frame of reference)

3)ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบมีบัสอ้างอิงเพียง 1 บัส

4)โหลดทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าคงที่

5)วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย (Equivalent pi circuit:π)

4.2.2 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลังจำแนกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่ 1 บัสที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator bus) และประเภทที่ 2 บัสที่มิได้ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือนิยมเรียกว่าโหลดบัส (Load bus)

ประเภทที่ 1 บัสที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสกำหนดโดยการควบคุมของอุปกรณ์รักษาแรงดัน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ ชั้นท์คาปาซิเตอร์ ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอคทีฟเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัส ดังนั้น ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับบัสชนิดนี้ จะกำหนดให้ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าคงที่ และเรียกบัสประเภทนี้ว่า บัสควบคุมแรงดัน (Voltage controlled bus) ในบรรดาบัสควบคุมแรงดันทั้งหมดจะเลือก 1 บัส ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังการผลิตที่ใหญ่ที่สุดเป็นบัสอ้างอิง (Reference bus, slack bus or swing bus) เหตุที่จะต้องมีบัสอ้างอิงเนื่องจากความจำเป็น 2 ประการ ประการแรก เพื่อให้เป็นจุดอ้างอิงของระบบ เนื่องจากภายหลังการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ซึ่งได้มานั้นเป็นมุมเปรียบเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง เพื่อให้สามารถบอกได้ว่า ที่บัสใดๆ จะมีมุมนำหน้า (Leading angle) หรือ ล้าหลัง (Lagging angle) มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง กรณีทั่วไปนิยมให้มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงเป็น 0.00 องศา ประการที่สอง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจะต้องรับภาระในการชดเชยกำลังสูญเสียและกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ยังไม่ได้รับการจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากก่อนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า กำลังสูญเสียในระบบเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า จึงไม่อาจบอกได้ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด จึงควรเลือกบัสที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังการผลิตที่ใหญ่ที่สุดเป็นบัสอ้างอิง เพื่อให้สามารถชดเชยกำลังสูญเสียของระบบได้อย่างเพียงพอ

ประเภทที่ 2 บัสที่มิได้ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือนิยมเรียกกันว่า โหลดบัส อันได้แก่ บัสอื่นๆ ที่ไม่เป็นประเภทบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง ที่บัสประเภทนี้จะมีค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟคงที่

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงจำแนกบัสในระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็น 3 ชนิด คือ

1)บัสอ้างอิง จะกำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

2)บัสควบคุมแรงดัน จะกำหนดให้ขนาดของแรงดันและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสมีค่าคงที่ ส่วนมุมของแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

3)โหลดบัส จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัสมีค่าคงที่ ส่วนขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นบัสชนิดใดก็ตาม จะกำหนดตัวแปร 2 ตัวให้มีค่าคงที่ และตัวแปรอีก 2 ตัวเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ซึ่งจะต้องอาศัยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

ชนิดของบัส	ตัวแปรที่ทราบค่า						ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณ			
	P_L	Q_L	P_G	Q_G	$\|V\|$	δ	P_G	Q_G	$\|V\|$	δ
บัสอ้างอิง	*	*			*	*	X	X		
บัสควบคุมแรงดัน	*	*	*		*			X		X
โหลดบัส	*	*	*	*					X	X

โดยที่ $|V|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส

δ คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส

P_G คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัส

Q_G คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ผลิตที่บัส

P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส

Q_L คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของโหลดที่บัส

* คือ การระบุตัวแปรที่ทราบค่า

X คือ การระบุตัวแปรที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดเพราะมีข้อดีหลายประการคือ จำนวนรอบของการคำนวณไม่ขึ้นกับขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง [12] อีกทั้งมีการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีด้วย

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด n บัส
สมการกำลังไฟฟ้าที่บัส p ใดๆ คือ

$$P_p - jQ_p = V_p^* . I_p \tag{4.3}$$

โดยที่ กระแสไฟฟ้าที่บัส p มีค่าดังนี้

$$I_p = \sum_{q=1}^{n} Y_{pq} \cdot V_q \tag{4.4}$$

แทนค่า I_p จากสมการที่ (4.4) ลงในสมการที่ (4.3) จะได้ว่า

$$P_p - jQ_p = V_p^* \cdot \sum_{q=1}^{n} Y_{pq} \cdot V_q \tag{4.5}$$

โดยที่ P_p คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส p

Q_p คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส p

V_p, V_q คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส p และ q ตามลำดับ

V_p^* คือ สังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p

I_p คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส p

Y_{pq} คือ สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

n คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลัง

กำหนดให้

$$V_p = e_p + jf_p \tag{4.6}$$

$$Y_{pq} = G_{pq} - jB_{pq} \tag{4.7}$$

แทนค่า V_p และ Y_{pq} จากสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ ลงในสมการที่ (4.5) จะได้ว่า

$$P_p - jQ_p = \left(e_p - jf_p\right) \cdot \sum_{q=1}^{n} \left\{\left(G_{pq} - jB_{pq}\right)\left(e_q + jf_q\right)\right\} \tag{4.8}$$

ทำการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (4.8) จะได้กำลังไฟฟ้าจริง P_p และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ Q_p สำหรับบัส p ใดๆที่เป็นโหลดบัส ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} P_p &= \sum_{q=1}^{n} \left\{e_p\left(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}\right) + f_p\left(f_q G_{pq} - e_q B_{pq}\right)\right\} \\ Q_p &= \sum_{q=1}^{n} \left\{f_p\left(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}\right) - e_p\left(f_q G_{pq} - e_q B_{pq}\right)\right\} \end{aligned}\right\} \tag{4.9}$$

สำหรับบัส p ที่เป็นบัสควบคุมแรงดัน จะทำการคำนวณขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส $|V_p|$ แทน กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส Q_p เพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ว่า ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส $|V_p|$ มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่กำหนดมากน้อยเพียงใดในการคำนวณแต่ละรอบ ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณสำหรับบัสควบคุมแรงดัน p คือ

$$\left.\begin{aligned} P_p &= \sum_{q=1}^{n} \left\{e_p\left(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}\right) + f_p\left(f_q G_{pq} - e_q B_{pq}\right)\right\} \\ |V_p|^2 &= e_p^2 + f_p^2 \end{aligned}\right\} \tag{4.10}$$

เนื่องจากสมการที่ (4.9) และ (4.10) มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าดังกล่าวจะต้องอาศัยการวิเคราะห์เชิงเลข (Numerical analysis) ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยอาศัยเทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iterative techniques) ด้วยการเริ่มต้นสมมติค่าคำตอบ จากนั้นคำนวณหาค่าปรับแต่ง (Correction) ของค่าคำตอบ เพื่อนำไปสู่การประมาณคำตอบในรอบถัดไป และทำการคำนวณซ้ำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าความคลาดเคลื่อนของค่าปรับแต่งของค่าคำตอบไม่

เกินค่าความผิดพลาด (Tolerance) ที่กำหนด ภายใต้จำนวนรอบที่ใช้คำนวณไม่เกินจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ และจะได้ว่าค่าประมาณในรอบการคำนวณสุดท้าย คือ คำตอบของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

4.2.4 การประยุกต์วิธีนิวตัน-ราฟสันระบบพิกัดเชิงขั้วในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากสมการที่ (4.9) และ (4.10) มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการแก้สมการดังกล่าวเพื่อให้ได้มาซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ จะต้องอาศัยหลักการแก้สมการพีชคณิตที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน มาใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า และจะได้สมการที่เป็นเชิงเส้นซึ่งอยู่ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด n บัส และมีจำนวนโหลดบัสเท่ากับ n_L กำหนดให้ แรงดันไฟฟ้าที่บัส p (V_p) และสมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Y_{pq}) อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้ว ดังนี้

$$V_p = |V_p|e^{j\delta_p} \tag{4.11}$$

$$Y_{pq} = |Y_{pq}|e^{j\theta_{pq}} \tag{4.12}$$

โดยที่ $|V_p|$, δ_p คือ ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p ตามลำดับ

$|Y_{pq}|$, θ_{pq} คือ ขนาดและมุมของสมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

แทนค่า V_p และ Y_{pq} จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ ลงในสมการที่ (4.5) จะได้ว่า

$$P_p - jQ_p = \left(|V_p|e^{-j\delta_p}\right) \cdot \sum_{q=1}^{n} \left\{\left(|Y_{pq}|e^{j\theta_{pq}}\right)\left(|V_q|e^{j\delta_q}\right)\right\} \tag{4.13}$$

ทำการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (4.13) จะได้กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอคทีฟที่บัส p ใดๆ ตามลำดับ ดังนี้

$$P_p = \sum_{q=1}^{n} |V_p V_q Y_{pq}| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad \text{สำหรับบัส p ใดๆ ยกเว้นบัสอ้างอิง} \quad (4.14)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^{n} |V_p V_q Y_{pq}| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad \text{สำหรับบัส p ที่เป็นโหลดบัส} \quad (4.15)$$

เนื่องจากสมการที่ (4.14) และ (4.15) มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนสมการดังกล่าวให้อยู่ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น โดยอยู่ในรูปของสมการความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \quad J \quad \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

โดยที่ ΔP คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส มีมิติเท่ากับ $(n-1)\times 1$ สำหรับบัส p ใดๆยกเว้นบัสอ้างอิง คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= P_{p(\text{schedule})} - P_p \\ &= \left(P_{p(\text{gen})} - P_{p(\text{load})}\right) - P_p \end{aligned} \quad (4.17)$$

ΔQ คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส มีมิติเท่ากับ $n_L \times 1$ สำหรับบัส p ใดๆที่เป็นโหลดบัส คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta Q_p &= Q_{p(\text{schedule})} - Q_p \\ &= \left(Q_{p(\text{gen})} - Q_{p(\text{load})}\right) - Q_p \end{aligned} \quad (4.18)$$

$\Delta\delta$ คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส มีมิติเท่ากับ $(n-1)\times 1$

$\Delta|V|$ คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส มีมิติเท่ากับ $(n-n_L-1)\times 1$ คำนวณได้จาก

$$\Delta|V_p|^2=|V_p|^2_{(schedule)}-|V_p|^2 \tag{4.19}$$

โดยที่ $|V_p|_{(schedule)}$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นไปตามการควบคุมหน่วยเป็นเปอร์ยูนิต (p.u.)

$|V_p|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p หน่วยเป็นเปอร์ยูนิต (p.u.)

J คือ จาโคเบียนเมตริกซ์ ประกอบด้วยจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_1, J_2, J_3 และ J_4 ดังสมการที่ (4.20)

โดยที่สมาชิกใดๆของจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อยเหล่านี้ ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่บัส และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสุทธิที่บัส เทียบกับมุม δ และขนาด $|V|$ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\begin{bmatrix} & J & \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

1) จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_1

$$J_1=\left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]_{(n-1)\times(n-1)} \tag{4.21ก}$$

สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของ J_1 สำหรับบัส p ใดๆ ยกเว้นบัสอ้างอิง ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่บัส เทียบกับมุม δ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} &= \left|V_p V_q Y_{pq}\right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ;p \neq q \\ \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} &= -\sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{n} \left|V_p V_q Y_{pq}\right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ;p = q\end{aligned}\right\} \qquad (4.21ข)$$

2) จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_2

$$J_2 = \left[\frac{\partial P}{\partial |V|}\right]_{(n-1)\times n_L} \qquad (4.22ก)$$

สมาชิกในตำแหน่งที่(p,q) ของ J_2 สำหรับบัส p ใดๆ ยกเว้นบัสอ้างอิงได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่บัส เทียบกับขนาด |V| ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial P_p}{\partial V_q} &= \left|V_p Y_{pq}\right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ;p \neq q \\ \frac{\partial P_p}{\partial V_p} &= 2\left|V_p Y_{pp}\right| \cos q_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{n} \left|V_q Y_{pq}\right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ;p = q\end{aligned}\right\} \qquad (4.22ข)$$

3) จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_3

$$J_3 = \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta}\right]_{n_L \times (n-1)} \qquad (4.23ก)$$

สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของ J_3 สำหรับบัส p ใดๆ ที่เป็นโหลดบัส ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสุทธิที่บัส เทียบกับมุม δ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} &= -\left|V_p V_q Y_{pq}\right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p \neq q \\
\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} &= \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{n} \left|V_p V_q Y_{pq}\right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p = q
\end{aligned}\right\} \qquad (4.23ข)$$

4) จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_4

$$J_4 = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|}\right]_{n_L \times n_L} \qquad (4.24ก)$$

สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของ J_4 สำหรับบัส p ใดๆ ที่เป็นโหลดบัส ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสุทธิที่บัส เทียบกับขนาด $|V|$ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial Q_p}{\partial V_q} &= \left|V_p Y_{pq}\right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p \neq q \\
\frac{\partial Q_p}{\partial V_p} &= -2\left|V_p Y_{pp}\right| \sin q_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{n} \left|V_q Y_{pq}\right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p = q
\end{aligned}\right\} \qquad (4.24ข)$$

จากสมการที่ (4.16) สามารถคำนวณหาค่าปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส ในการคำนวณรอบที่ k ได้ โดยแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ของการคำนวณในรอบที่ k+1 คำนวณได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} \delta_p^{(k+1)} &= \delta_p^{(k)} + \Delta\delta_p^{(k)} \\ |V_p|^{(k+1)} &= |V_p|^{(k)} + \Delta|V_p|^{(k)} \end{aligned}\right\} \qquad (4.25)$$

เงื่อนไขการลู่เข้าของคำตอบ คือ

$$\left.\begin{aligned} |\max\Delta P^{(k)}| &\le \varepsilon_P \\ |\max\Delta Q^{(k)}| &\le \varepsilon_Q \\ k &\le k_{max} \end{aligned}\right\} \qquad (4.26)$$

โดยที่ $|\max\Delta P^{(k)}|$ คือขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดทางกำลังไฟฟ้าจริงสำหรับการคำนวณในรอบที่ k ใดๆ

$|\max\Delta Q^{(k)}|$ คือขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดทางกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสำหรับการคำนวณในรอบที่ k ใดๆ

ε_P คือ ค่าผิดพลาดที่กำหนดให้ยอมรับได้ทางกำลังไฟฟ้าจริง

ε_Q คือ ค่าผิดพลาดที่กำหนดให้ยอมรับได้ทางกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ

k คือ จำนวนรอบที่ใช้คำนวณเพื่อการลู่เข้าของคำตอบ

k_{max} คือ จำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดให้คำนวณได้

4.2.5 การคำนวณกำลังไฟฟ้าและกำลังสูญเสียในสายส่ง

หลังจากที่ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน เพื่อคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆแล้ว สามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ไหลและกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงต่างๆได้ดังนี้

1) กำลังไฟฟ้าและกำลังสูญเสียในสายส่ง

พิจารณาสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส p กับบัส q ดังรูปที่ 2.3 กระแสไฟฟ้าที่บัส p (i_p) คำนวณได้ดังนี้

$$i_p = i_{line} + i_{charging}$$

$$= (V_p - V_q) \cdot y_{serpq} + V_p \cdot \frac{y_{shtpq}}{2} \qquad (4.27)$$

โดยที่ i_{line} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq

$i_{charging}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ลงสู่พื้นดินตามไลน์ชาร์จจิ้ง

V_p และ V_q คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส p และ q ตามลำดับ

y_{serpq} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรมของสายส่ง pq มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{R_{pq} + jX_{pq}}$

$\frac{y_{shtpq}}{2}$ คือ ครึ่งหนึ่งของค่าไลน์ชาร์จจิ้งแอดมิตแตนซ์ทั้งหมดของสายส่ง pq

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq จากบัส p ไปสู่บัส q คำนวณได้ดังนี้

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* i_p \qquad (4.28)$$

แทนค่า i_p จากสมการที่ (4.27) ลงในสมการที่ (4.28) จะได้ว่า

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^*(V_p - V_q)y_{serpq} + V_p^* V_p \frac{y_{shtpq}}{2} \qquad (4.29)$$

ในทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq จากบัส q ไปสู่บัส p คำนวณได้ดังนี้

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^*.(V_q - V_p).y_{serpq} + V_q^*.V_q.\frac{y_{shtpq}}{2} \qquad (4.30)$$

กำลังสูญเสียในสายส่ง pq มีค่าเท่ากับ ผลรวมทางพีชคณิตของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส p ไปสู่บัส q และที่ไหลจากบัส q ไปสู่บัส p ดังนี้

$$P_{loss(pq)} = P_{pq} + P_{qp} \tag{4.31}$$

2) กำลังไฟฟ้าและกำลังสูญเสียในหม้อแปลง

พิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 (ก) กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ไปสู่บัส q คือ

$$P_{pq} - jQ_{pq} = \left(\frac{1}{a^*}\right) . V_p^* . \left[\left(\frac{1}{a}\right) . V_p - V_q\right] . y_{pq} \tag{4.32}$$

ในทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส q ไปสู่บัส p คือ

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^* . \left[V_q - \frac{V_p}{a}\right] . y_{pq} \tag{4.33}$$

สำหรับกำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมอยู่ระหว่างบัส p และบัส q สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.31) ทำนองเดียวกับสายส่ง

4.2.6 ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากหลักการที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน มีขั้นตอนดังนี้ และสามารถสรุปเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 4.1

1) สร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2
2) สมมติค่าแรงดันเริ่มต้นที่บัสต่างๆ ยกเว้นที่บัสอ้างอิง $V_p^{(0)}$

   โดยที่ $p = 1,2,...,n$ และ $p \neq$ reference bus

3) กำหนดให้ $k = 0$

4) คำนวณปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

-ถ้าบัส p เป็นโหลดบัส ทำการคำนวณ $P_p^{(k)}$ และ $Q_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (4.14) และ (4.15) ตามลำดับ

-ถ้าบัส p เป็นบัสควบคุมแรงดัน ทำการคำนวณ $P_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (4.14)

5) คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

-ถ้าบัส p เป็นโหลดบัส ทำการคำนวณ $\Delta P_p^{(k)}$ และ $\Delta Q_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (4.17) และ(4.18) ตามลำดับ

-ถ้าบัส p เป็นบัสควบคุมแรงดัน ทำการคำนวณ $\Delta P_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (4.17)

6) ตรวจสอบเงื่อนไข ถ้าเงื่อนไขตามสมการที่ (4.26) เป็นจริง แล้วให้ไปทำขั้นตอนที่ 11 มิฉะนั้นให้เริ่มต้นทำขั้นตอนที่ 7

7) คำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ J จากสมการที่ (4.20) ถึงสมการที่ (4.24)

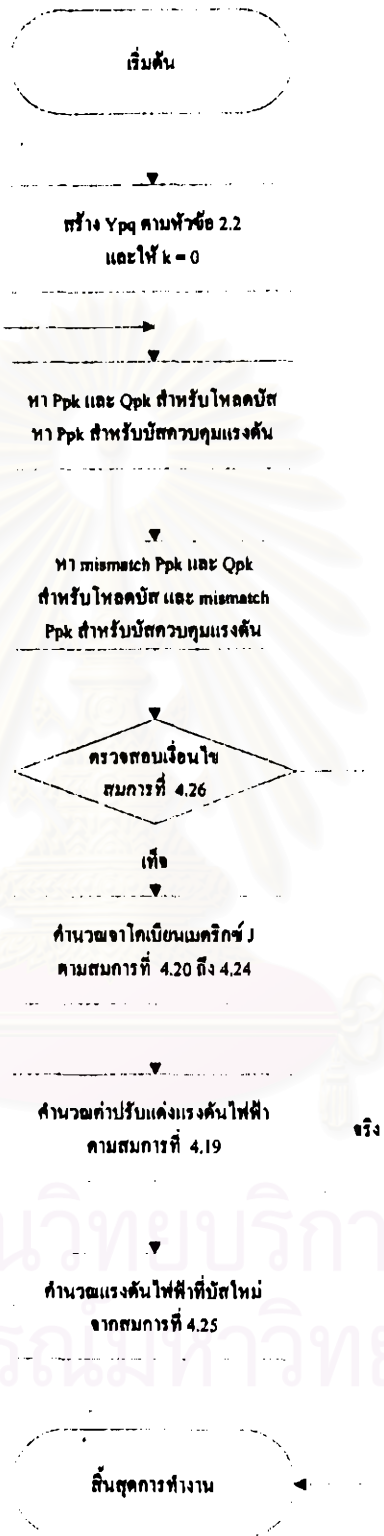
8) คำนวณค่าปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ จากสมการที่ (4.19)

9) คำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ ตามสมการที่ (4.25)

10) ให้ $k = k+1$ แล้วย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 9

11) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านและกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงต่างๆ ตามหัวข้อ 4.2.5 และสิ้นสุดการทำงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

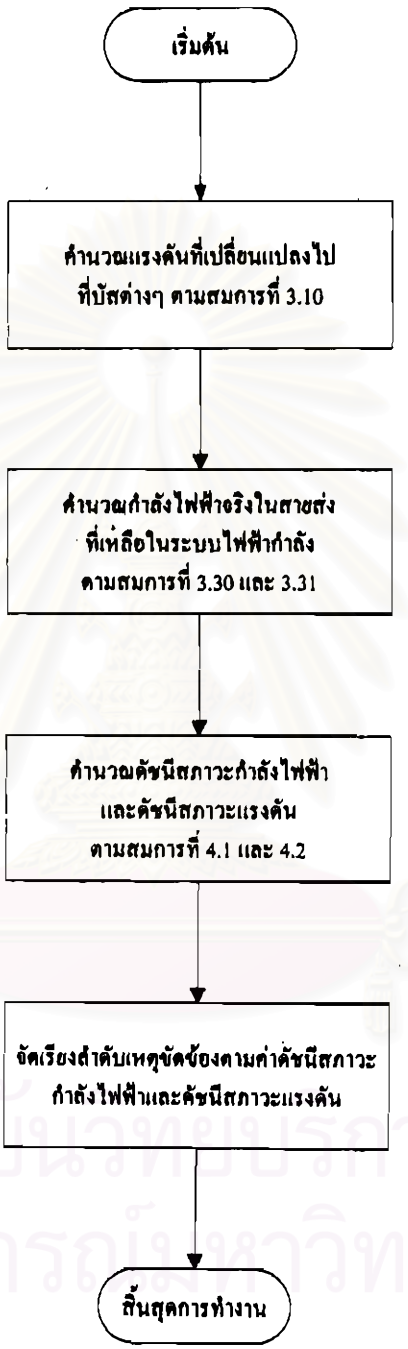
4.3 การจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} สำหรับการประเมินความมั่นคงในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากบทที่ 3 แสดงถึงการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ซึ่งเมื่อเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถคำนวณค่าแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่เหลือในระบบไฟฟ้ากำลังหลังเกิดเหตุขัดข้องได้อย่างรวดเร็ว เพียงแค่อาศัยผลจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนเกิดเหตุขัดข้อง ร่วมกับบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ Z_{bus} และคำตอบที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าหลังเกิดเหตุขัดข้อง

เมื่อได้ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่เหลือในระบบไฟฟ้ากำลังหลังเกิดเหตุขัดข้องแล้ว สามารถทำการคำนวณค่าดัชนีสภาวะแรงดัน และค่าดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้าได้ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1 จากนั้นนำค่าดัชนีสภาวะที่คำนวณได้ไปทำการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องตามระดับความรุนแรงที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังหลังเกิดเหตุขัดข้อง เพื่อทำการประเมินความมั่นคงในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป จากวิธีการที่กล่าวมาสามารถสรุปเป็นขั้นตอนและวิธีการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} ได้ดังแผนภาพในรูปที่ 4.2

1) คำนวณแรงดันที่บัสต่างๆ หลังเกิดเหตุขัดข้อง
2) คำนวณกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่เหลือในระบบหลังเกิดเหตุขัดข้อง
3) คำนวณดัชนีสภาวะกำลังไฟฟ้าและดัชนีสภาวะแรงดัน
4) จัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องตามค่าดัชนีสภาวะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการจัดเรียงลำดับเหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus}