

การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า (Available Transfer Capability: ATC) นั้น องค์ประกอบหลักที่เป็นส่วนสำคัญคือ ค่ากำลังส่งรวม (Total Transfer Capability: TTC) ซึ่งหมายถึง ปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถของระบบส่งที่สามารถรองรับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากจุดหนึ่ง (บริเวณ) ไปยังอีกจุดหนึ่ง(บริเวณ)ได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบส่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำนวนมาก ดังนั้นจึงอาจเกิดการชำรุดขณะปฏิบัติงานได้ ด้วยเหตุนี้ค่ากำลังส่งรวมจึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาผลในส่วนนี้ด้วย สำหรับวิธีการโดยทั่วไปจะทำการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ สภาวะการทำงานปกติ และ สภาวะเกิดเหตุขัดข้องที่มีความสำคัญ (N-1 Contingency) และทำการ กำหนดค่ากำลังส่งรวมจากค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจาก กรณีที่มีค่าต่ำสุด

งานวิจัยที่ผ่านมาการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำโดยอาศัย 3 แนวทางหลัก คือ

- 1) **วิธีการที่อาศัยการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์ เป็นพื้นฐาน [4-7]** วิธีการต่างๆ ในแนวทางนี้จะทำการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์ ณ แต่ละระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขที่กำหนดหากพบว่ายังไม่เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขก็จะทำการเพิ่มระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งผลตอบที่ได้รับขัดแย้งกับเงื่อนไขขึ้น ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าก่อนที่จะเกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขจะถูกกำหนดเป็นค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด นอกจากนี้ในบางกรณีที่มีการพิจารณาผลของเงื่อนไขเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า การคำนวณจะเลือกใช้ Continuation Power Flow [8] แทนการคำนวณ เพาเวอร์ฟลว์แบบดั้งเดิมเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในทางคณิตศาสตร์ วิธีในกลุ่มนี้มีข้อดี คือ ง่ายต่อการทำความเข้าใจ แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการคำนวณสูง เนื่องจากหากต้องการความละเอียดมากจะต้องทำการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์จำนวนมากด้วย
- 2) **วิธี Optimization** วิธีในกลุ่มนี้จะทำการจัดรูปแบบปัญหาให้อยู่ในรูปปัญหาค่าสูงสุด โดยมีสมการเงื่อนไขคือสมการเพาเวอร์ฟลว์ และ เงื่อนไขในการดำเนินการจะรวมไว้ในส่วนของสมการเงื่อนไข จากนั้นจึงเริ่มต้นคำนวณหาคำตอบ ตัวอย่างของวิธีในกลุ่มนี้ คือ Interior Point [9], Genetic Algorithm [10] เป็นต้น ข้อดีของวิธีในกลุ่มนี้คือ คำตอบที่ได้มีความแม่นยำสูง สำหรับข้อเสียคือ เวลาในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อระบบมีขนาดใหญ่มากขึ้น

- 3) **วิธีการคำนวณค่าตอบโดยการประมาณ** วิธีในกลุ่มนี้โดยทั่วไปจะใช้การประมาณแบบเส้นตรงเป็นหลัก [4,11-13] วิธีในกลุ่มนี้มีข้อดี คือ สามารถคำนวณได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ค่าตอบที่ได้จากวิธีการในกลุ่มนี้จะเป็นค่าโดยประมาณดังนั้นการนำคำตอบไปใช้จะต้องเลือกความละเอียดให้เหมาะสมกับความจำเป็นของงานด้วย

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเราจะพบว่าการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นมีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อการคำนวณหาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า ดังนั้นในบทนี้ผู้ทำวิจัยจะอธิบายถึงวิธีในการคำนวณพร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณประกอบความเข้าใจ และในที่สุดท้ายของบทจะทำการสรุปข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการเพื่อให้เลือกวิธีการที่เหมาะสมไปเป็นองค์ประกอบหนึ่งในการหาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าต่อไป

3.1 เงื่อนไขบังคับในการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

- **เงื่อนไขอุณหภูมิ** กำหนดจากปริมาณของกระแสไฟฟ้ามากที่สุดที่สามารถไหลในสายส่งหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด ก่อนที่จะเสียหายอย่างถาวรด้วยความร้อนที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปกำหนดโดย ขนาดกระแส หรือ ค่าพิกัด MVA ของสายส่ง
- **เงื่อนไขขนาดแรงดันไฟฟ้า** การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจะต้องรักษาไว้ภายใต้ช่วงที่ยอมรับได้ เช่น ขนาดแรงดันต่ำสุดสามารถกำหนดจากการส่งกำลังไฟฟ้ามากที่สุดที่ยังไม่เกิดอันตรายต่อระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ของผู้ใช้โดยที่หากไม่สามารถรักษาระดับแรงดันได้ผลก็คือเกิดการพังทลายของแรงดันซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อกริดไฟดับบางส่วนหรือทั้งระบบไฟฟ้าเลยก็ได้
- **เงื่อนไขขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** ในที่นี้กำหนดว่าค่ากำลังจริงที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องต้องมีค่าไม่เกินค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ
- **เงื่อนไขทางด้านเสถียรภาพ** ระบบต้องสามารถทนต่อการรบกวนภายในช่วง transient และ dynamic ได้ (เวลาอาจอยู่ในหน่วย 1 ใน 1000 วินาที หรือ อาจเป็นหลายๆ นาที) ในกรณีปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ต่ออยู่กับระบบจะทำงานที่ค่าความถี่เดียวกัน แต่เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเริ่มแกว่งเมื่อเทียบกับเครื่องอื่นๆ ซึ่งยังทำงานอยู่ในสภาวะปกติสำหรับระบบที่มีเสถียรภาพนั้นการแกว่งดังกล่าวจะหายไปและจุดทำงานก็จะเคลื่อนตัวไปสู่จุดทำงานใหม่ที่มีเสถียรภาพ ในกรณีที่ระบบไม่สามารถเคลื่อนตัวไปสู่จุดที่มีเสถียรภาพจุดใหม่ได้ทันแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจสูญเสีย synchronism ได้ จากเหตุนี้้อาจทำให้ระบบทั้งหมดหรือบาง

ส่วนไม่มีเสถียรภาพได้ ผลอีกอย่างของการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพนั้นก็คือ อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายและผลนี้อาจทำให้ต้องตัดไฟที่จ่ายให้กับผู้ใช้เป็นวงกว้างด้วย

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้การคำนวณหาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเป็นการพิจารณาในสถานะอยู่ตัวดังนั้นเงื่อนไขทางด้านเสถียรภาพของระบบจึงถูกละเลยไป คงไว้แต่เงื่อนไขอุณหภูมิของสายส่ง เงื่อนไขขนาดแรงดันไฟฟ้า และเงื่อนไขขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2 การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ [4]

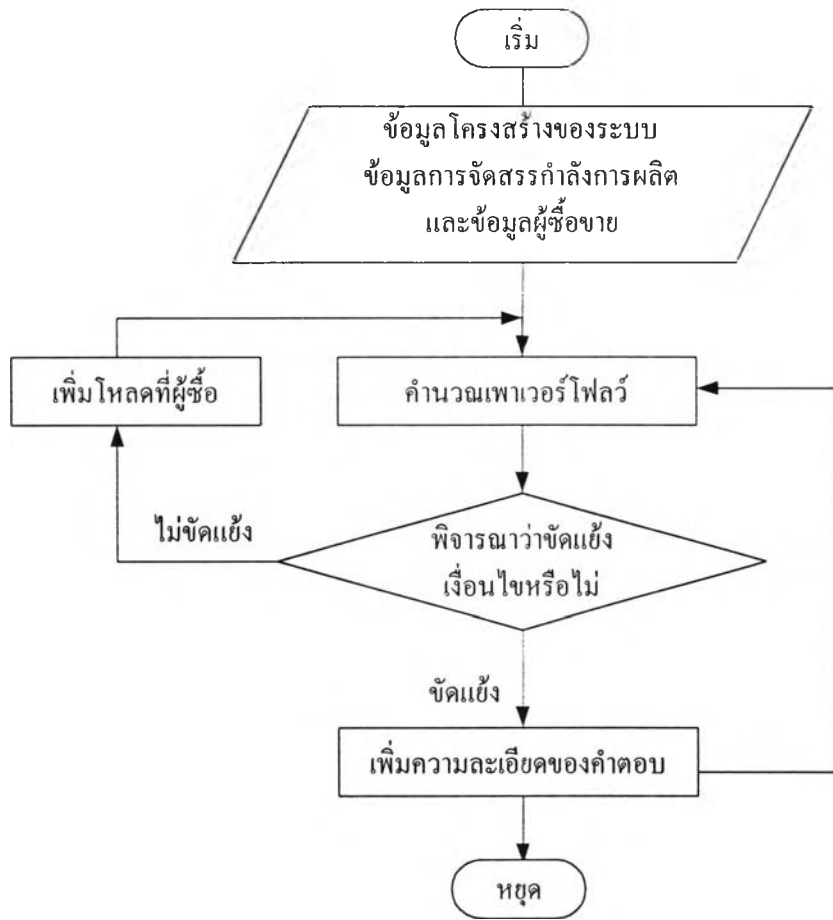
การคำนวณเริ่มต้นจากการรับข้อมูลโครงสร้างของระบบ ข้อมูลการจัดสรรกำลังการผลิต และข้อมูลผู้ซื้อขาย จากนั้นทำการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ โดยกำหนดให้ผู้ขายเป็น slack bus คำตอบที่ได้จะถูกตรวจสอบกับเงื่อนไข ซึ่งหากไม่ขัดแย้งจะทำการเพิ่มโหลด ณ บัสผู้ซื้อขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างคู่ค้า การเพิ่มโหลดและการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ จะดำเนินไปจนกระทั่งจุดทำงานที่ได้จากเพาเวอร์โพลว์ เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไข ณ จุดนี้เราจะพอจะทราบได้ว่าคำตอบที่ถูกต้องจะต้องอยู่ระหว่างโหลดค่าก่อนหน้าและโหลดที่ทำให้เกิดการขัดแย้งเงื่อนไข อย่างไรก็ตาม เรายังไม่ทราบค่าที่แน่นอนของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยวิธี Bisection ที่เสนอโดย [6] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อทราบขอบเขตของคำตอบดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 แล้วจะคำนวณเพาเวอร์โพลว์ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่วงดังกล่าว จากนั้นจะตรวจสอบเงื่อนไข หากจุดทำงานที่คำนวณได้ขัดแย้งกับเงื่อนไขจะเลือกช่วงที่มีค่าน้อยกว่า (ช่วงที่ 1) โดยการกำหนดจุดกึ่งกลางเป็นขอบบนของคำตอบ แต่หากจุดทำงานที่คำนวณได้ไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขจะเลือกช่วงที่มีค่ามากกว่า (ช่วงที่ 2) โดยการกำหนดจุดกึ่งกลางเป็นขอบล่างของคำตอบ จากหลักการดังกล่าวนี้คำตอบที่ได้จากการคำนวณจะมีความละเอียดมากขึ้นโดยพิจารณาจากระยะห่างของขอบบนและขอบล่างของคำตอบ



รูปที่ 3.1 การเพิ่มความละเอียดของคำตอบ

จากหลักการที่ได้กล่าวมาข้างต้นเราสามารถเขียนสรุปขั้นตอนในการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการคำนวณเพาเวอร์โพลว์

3.3 การประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบเชิงเส้นวิธีที่ 1 [4]

จากข้อมูลโครงสร้างของระบบ ข้อมูลการจัดสรรกำลังการผลิต และ ข้อมูลผู้ซื้อผู้ขาย ทำการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ ในกรณีพื้นฐานเพื่อกำหนดจุดทำงานของระบบ จากนั้นให้ทำการเพิ่มโหลด ณ บัสผู้ซื้อแบบตัวประกอบกำลังคงที่ และกำหนดให้บัสผู้ขายเป็น slack แล้วทำการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ ซ้ำซึ่งจะได้จุดทำงานใหม่หลังจากการเพิ่มโหลด จากจุดทำงานทั้งสองนี้ด้วยวิธีการประมาณแบบเชิงเส้นเราจะสามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลของ กำลังไฟฟ้า แรงดัน และ กำลังการผลิตเทียบกับการเพิ่มของโหลด $(\frac{dS_{jk}}{dS_L}, \frac{dV_i}{dS_L}, \frac{dP_G}{dS_L})$ ได้

จากการประมาณแบบเชิงเส้นเราสามารถคำนวณค่าโหลดที่เพิ่มขึ้นแล้วทำให้จุดทำงานอยู่ที่เงื่อนไขของระบบพอดีได้ดังนี้

$$\Delta S_L^S = \begin{cases} (S_{jk,limit} - S_{jk}^0) / \left(\frac{dS_{jk}}{dS_L} \right); \frac{dS_{jk}}{dS_L} > 0 \\ (-S_{jk,limit} - S_{jk}^0) / \left(\frac{dS_{jk}}{dS_L} \right); \frac{dS_{jk}}{dS_L} < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\Delta S_L^V = (V_{limit} - V^0) / \left(\frac{dV_i}{dS_L} \right) \quad (3.2)$$

$$\Delta S_L^G = (P_{G,limit} - P_G^0) / \left(\frac{dP_G}{dS_L} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ

V_{limit} คือ ค่าขอบเขตขนาดแรงดันไฟฟ้า ในหน่วย p.u.

$S_{limit,jk}$ คือ ค่าพิกัดอุณหภูมิของสายส่ง j-k ในหน่วย MVA

$P_{G,limit}$ คือ ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผู้ขาย ในหน่วย MW

V_i^0 คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า ณ บัส i ที่สภาวะโหลดพื้นฐาน

S_{jk}^0 คือ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปรากฏจากบัส j ไปยังบัส k ณ สภาวะโหลดพื้นฐาน

P_G^0 คือ กำลังการผลิต ณ ผู้ขายในสภาวะโหลดพื้นฐาน

ΔS_L^Ω คือ ค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้ ณ บัสผู้ซื้อเมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไข Ω ในหน่วย MVA

จากสมการที่ (3.1)-(3.3) เนื่องจากเราทราบค่าตั้งแต่เริ่มต้นดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าโหลดที่สามารถเพิ่มได้มากที่สุด (ΔS_L) โดยที่ยังไม่ขัดเงื่อนไขบังคับของระบบคำนวณได้จากสมการที่ (3.4) และค่าดังกล่าวนี้จะให้เป็นตัวกำหนดค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Transfer: MT) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$\Delta S_L = \min\{\Delta S_L^S, \Delta S_L^V, \Delta S_L^G\} \quad (3.4)$$

$$MT = S_L^0 + \Delta S_L \quad (3.5)$$

อย่างไรก็ดี จากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่ละรอบนั้น จะต้องมีการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ จำนวน 2 ครั้ง ซึ่งเมื่อพิจารณาเหตุขัดข้องจำนวนมากวิธีการนี้จะใช้

เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นในส่วนถัดไปจะเสนอแนวทางในการลดเวลาการคำนวณลงโดยใช้ข้อมูลเมตริกซ์ Jacobian ผกผัน (Inverse Jacobian Matrix)

3.3.1 การลดเวลาในการคำนวณเพาเวอร์โพล์

กรณีที่ 1 การคำนวณเพาเวอร์โพล์ เมื่อมีการเพิ่มโหลด ณ สภาวะปกตินั้นหากทำการสมมติว่าค่าตัวแปรสถานะของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมไม่มาก แล้วเราจะสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าเมตริกซ์ Jacobian ที่ขึ้นกับตัวแปรสถานะของระบบมีค่าคงที่ จากสมมติฐานเช่นนี้ทำให้สามารถคำนวณเพาเวอร์โพล์ ได้เร็วขึ้นเนื่องจากลดเวลาในการสร้างเมตริกซ์ Jacobian และการคำนวณค่าเมตริกซ์ผกผัน แนวคิดดังกล่าวนี้เมื่อนำมาใช้จะมีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้

จากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ ณ ค่าโหลดพื้นฐาน ที่สภาวะไม่เกิดเหตุขัดข้อง เราจะได้ตัวแปรสถานะของระบบ V_i, δ_i และเมตริกซ์ Jacobian ผกผันในรอบสุดท้ายของการคำนวณ ซึ่งในที่นี้จะแทนด้วย J_0^{-1} แต่เมื่อมีการเพิ่มโหลด ณ บัสผู้ซื้อ ตัวแปรสถานะของระบบจะมีเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J_0^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{mis} \\ \Delta Q_{mis} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

โดยที่

$\Delta\delta, \Delta V$ คือ เวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงมุมและขนาดแรงดันไฟฟ้า

$\Delta P_{mis}, \Delta Q_{mis}$ คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

ค่าตัวแปรสถานะที่ได้หลังจากการปรับปรุงด้วยคำตอบของสมการที่ (3.6) แล้ว จะถูกนำไปคำนวณ $\Delta P_{mis}, \Delta Q_{mis}$ อีกครั้งเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งถ้าค่าดังกล่าวยังมากอยู่เราจะทำการคำนวณสมการที่ (3.6) ซ้ำจนกระทั่งค่า $\Delta P_{mis}, \Delta Q_{mis}$ ที่คำนวณได้ใหม่มีขนาดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้

กรณีที่ 2 กรณีเกิดเหตุขัดข้อง (สายส่งชำรุด) ขึ้นในระบบ

สำหรับการพิจารณาเหตุขัดข้องแต่ละเหตุการณ์นั้นการคำนวณหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงจำเป็นต้องมีการคำนวณเพาเวอร์โพล์ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่หนึ่ง ณ ค่าโหลดพื้นฐาน และ ครั้งที่สองเมื่อมีการเพิ่มโหลด ณ บัสผู้ซื้อ ซึ่งสามารถอธิบายการคำนวณสำหรับแต่ละวิธีได้ดังนี้

กรณี 2A การคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ ณ ค่าโหลดพื้นฐาน ที่สภาวะเกิดเหตุขัดข้อง

การคำนวณเริ่มต้นจากสมมติฐานว่าตัวแปรสถานะของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมไม่มาก แต่ปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าตัวแปรสถานะดังกล่าวเปลี่ยนค่าไป คือ เหตุการณ์ที่เกิดการหลุดออกของสายส่ง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J_i^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{mis} \\ \Delta Q_{mis} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยที่

$\Delta\delta, \Delta V$ คือ เมตริกซ์ค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมและขนาดแรงดันไฟฟ้า

$\Delta P_{mis}, \Delta Q_{mis}$ คือ เมตริกซ์ค่าความต่างระหว่างค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่คำนวณได้จากตัวแปรสถานะเทียบกับที่กำหนดไว้

J_i^{-1} คือ เมตริกซ์ Jacobian ผกผันที่เปลี่ยนแปลงจาก J_0^{-1} เนื่องจากการหลุดออกของสายส่ง สำหรับวิธีในการคำนวณค่านี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

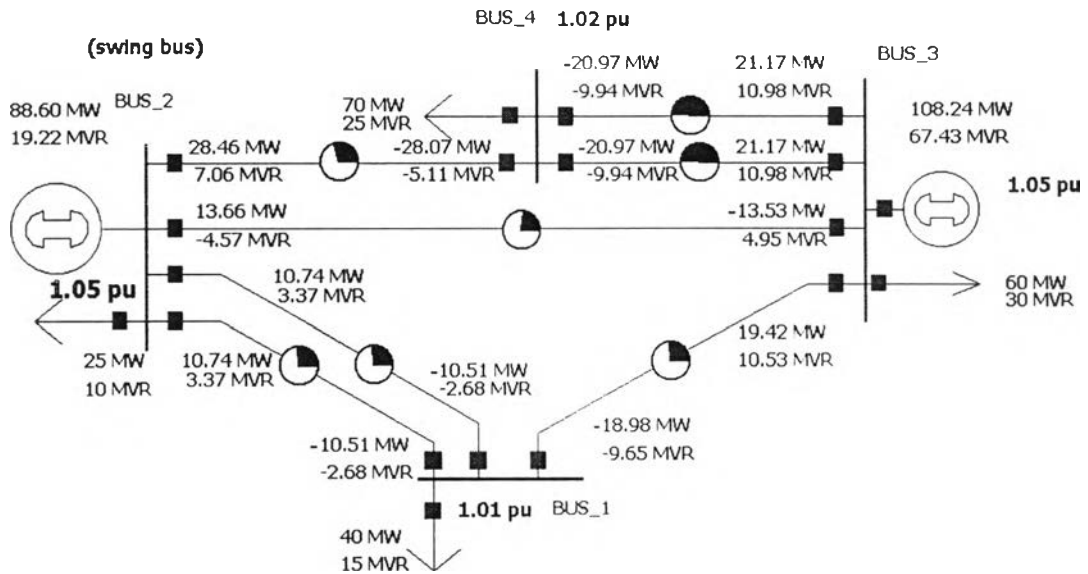
ค่าตัวแปรสถานะที่ได้หลังจากการปรับปรุงด้วยคำตอบของสมการที่ (3.7) แล้ว จะถูกนำไปคำนวณ $\Delta P_{mis}, \Delta Q_{mis}$ อีกครั้งเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งถ้าค่าดังกล่าวยังสูง เราจะทำการคำนวณสมการที่ (3.7) ซ้ำจนกระทั่งค่า $\Delta P_{mis}, \Delta Q_{mis}$ ที่คำนวณได้ใหม่มีขนาดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้

กรณี 2B การคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ เมื่อค่าโหลด ณ บัสผู้ซื้อถูกเพิ่มค่าขึ้น ที่สภาวะเกิดเหตุขัดข้อง การคำนวณจะกระทำเช่นเดียวกับกรณี 2A เพียงแต่โหลด ณ บัสผู้ซื้อถูกเพิ่มค่าขึ้น ดังนั้นการคำนวณยังคงสามารถใช้สมการที่ (3.7) ได้ โดยค่าตัวแปรสถานะเริ่มต้นจะนำมาจากผลการคำนวณในกรณี 2A

ตัวอย่างที่ 3.1 จากระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส 7 สายส่ง ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 และมีค่าพารามิเตอร์แสดงไว้ในภาคผนวก ข ในตัวอย่างนี้จะแสดงการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากบัสที่ 2 ไปยังบัสที่ 1 ด้วยวิธีการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2

จากผลการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ ณ ค่าโหลดกรณีพื้นฐานดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 พบว่าระบบไฟฟ้ายังคงดำเนินการอยู่ภายใต้เงื่อนไขขนาดแรงดันไฟฟ้า เงื่อนไขค่าพิกัดของสายส่ง และเงื่อนไขค่าพิกัดกำลังการผลิต ดังนั้นจึงทำการเพิ่มโหลด ณ บัสที่ 1 ครั้งละ 20 % ของโหลดในกรณี

พื้นฐาน (แบบตัวประกอบกำลังคงที่) และทำการคำนวณเพาเวอร์โพล์ ซึ่งเพื่อนำผลที่ได้มาทำการตรวจสอบว่าเกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส 7 สายส่ง

ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์ ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างเมื่อทำการเพิ่มโหลด

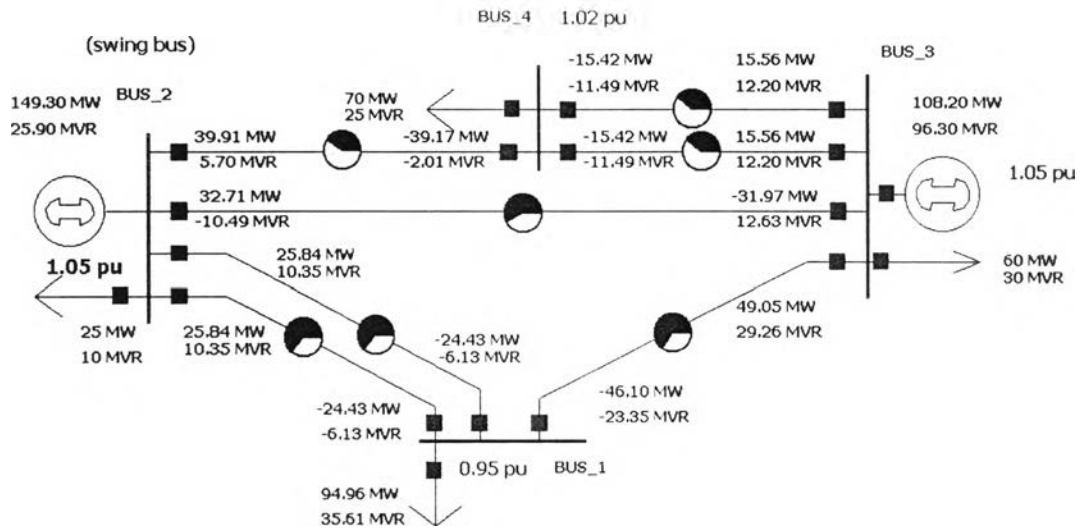
รอบที่	ค่าโหลด ณ บัสที่ 1	ผลการตรวจสอบ
1	40 MW, 15 MVAR	ระบบอยู่ในสภาวะปกติ
2	48 MW, 18 MVAR	ระบบอยู่ในสภาวะปกติ
3	56 MW, 21 MVAR	ระบบอยู่ในสภาวะปกติ
4	64 MW, 24 MVAR	ระบบอยู่ในสภาวะปกติ
5	72 MW, 27 MVAR	ระบบอยู่ในสภาวะปกติ
6	80 MW, 30 MVAR	ระบบอยู่ในสภาวะปกติ
7	88 MW, 33 MVAR	ระบบอยู่ในสภาวะปกติ
8	96 MW, 36 MVAR	$V_i < 0.95$ p.u.

ผลจากตารางที่ 3.1 ทำให้ทราบว่าค่าโหลดมากที่สุด ณ บัสที่ 2 โดยที่ยังไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขขนาดแรงดันไฟฟ้า มีค่าอยู่ในช่วง 88 MW, 33 MVAR ถึง 96 MW, 36 MVAR แต่อย่างไรก็ตามช่วงดังกล่าวยังถือว่ากว้างมากดังนั้นเพื่อเพิ่มความละเอียดของคำตอบ จึงประยุกต์ใช้วิธี Bisection ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเพิ่มความละเอียดของคำตอบด้วยวิธี Bisection

รอบที่	ขอบล่าง	ขอบบน	กึ่งกลาง	ผลการตรวจสอบ
1	88 , 33	96 , 36	92 , 34.5	ปกติ
2	92 , 34.5	96 , 36	94 , 35.25	ปกติ
3	94 , 35.25	96 , 36	95 , 35.625	$V_1 < 0.95$ p.u.
4	94 , 35.25	95 , 35.625	94.5 , 35.4375	ปกติ
5	94.5 , 35.4375	95 , 35.625	94.75 , 35.5313	ปกติ
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	94.9531 , 35.6075	94.9687 , 35.6133	94.9609 , 35.6104	ปกติ

ตารางที่ 3.2 นี้ในรอบการคำนวณแต่ละรอบจะต้องมีการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ หนึ่งครั้งและตรวจสอบเงื่อนไขซึ่งถ้าไม่เกิดการขัดแย้งขึ้น (ปกติ) จะกำหนดให้จุดกึ่งกลางเป็นขอบล่างในการคำนวณรอบถัดไป และถ้าเกิดการขัดแย้งขึ้นจะกำหนดให้จุดกึ่งกลางเป็นขอบบน ในที่นี้ทำการคำนวณทั้งหมด 10 รอบซึ่งจะได้ความละเอียดของคำตอบคือ $20\%/2^{10}$ หรือ 0.0195 % ของค่าโหลด ณ กรณีพื้นฐาน และได้ค่าโหลดมากที่สุดที่สามารถเพิ่มได้ ณ บัสที่ 1 คือ 94.9609 MW, 35.6104 MVAR ค่านี้จะถูกกำหนดเป็นค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากผู้ขาย ณ บัสที่ 2 ไปยังผู้ซื้อ ณ บัสที่ 1 สำหรับจุดทำงานของระบบ ณ สภาวะที่เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ ณ สภาวะที่เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากบัส 2 ไปยังบัส 1

ตัวอย่างที่ 3.2 แสดงการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากบัสที่ 2 ไปยังบัสที่ 1 ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้นวิธีที่ 1 ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3

ขั้นที่ 1

เริ่มต้นจากการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ สำหรับโหลดในกรณีพื้นฐานโดยมีการกำหนดให้บัสผู้ขายเป็น Swing bus และทำการเพิ่มโหลดขึ้นที่บัสผู้ซื้อ 10 MVA แบบตัวประกอบกำลังคงที่และทำการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ ซ้ำ ณ ค่าโหลดค่าใหม่ ซึ่งจากผลการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ ทั้งสองนี้จะทำให้เราสามารถคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลของ กำลังไฟฟ้า แรงดัน และ กำลังการผลิต

เทียบกับการเพิ่มของโหลด $(\frac{dS}{dS_L}, \frac{d|V|}{dS_L}, \frac{dP_G}{dS_L})$ ได้ ดังนี้

$$\frac{dS_{ij}}{dS_L} = \left[\frac{dS_{12,1}}{dS_L} \quad \frac{dS_{12,2}}{dS_L} \quad \frac{dS_{13}}{dS_L} \quad \frac{dS_{23}}{dS_L} \quad \frac{dS_{24}}{dS_L} \quad \frac{dS_{34,1}}{dS_L} \quad \frac{dS_{34,2}}{dS_L} \right]^T$$

$$= [0.2471 \quad 0.2471 \quad 0.5111 \quad 0.3221 \quad 0.1746 \quad -0.0724 \quad -0.0724]^T$$

$$\frac{dS_{ji}}{dS_L} = \left[\frac{dS_{21,1}}{dS_L} \quad \frac{dS_{21,2}}{dS_L} \quad \frac{dS_{31}}{dS_L} \quad \frac{dS_{32}}{dS_L} \quad \frac{dS_{42}}{dS_L} \quad \frac{dS_{43,1}}{dS_L} \quad \frac{dS_{43,2}}{dS_L} \right]^T$$

$$= [0.2698 \quad 0.2698 \quad 0.5569 \quad 0.3221 \quad 0.1698 \quad -0.0705 \quad -0.0705]^T$$

$$\frac{dV}{dS_L} = \left[\frac{dV_1}{dS_L} \quad \frac{dV_1}{dS_L} \quad \frac{dV_1}{dS_L} \quad \frac{dV_1}{dS_L} \right]^T = [-0.9678 \quad 0 \quad 0 \quad -0.0042]^T \times 10^{-3}$$

$$\frac{dP_G}{dS_L} = \left[\frac{dP_{G2}}{dS_L} \quad \frac{dP_{G3}}{dS_L} \right]^T = [0.995 \quad 0]^T$$

ขั้นที่ 2

จากผลการคำนวณในขั้นที่ 1 ต่อไปเราจะทำการคำนวณค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดของเงื่อนไขขีดจำกัดแต่ละเงื่อนไข ซึ่งการคำนวณโดยสมการที่ (3.1)-(3.3) สามารถทำได้ดังนี้

$$\Delta S_{T_{ij}} = \begin{bmatrix} (40 - 10.8451) / 0.2471 \\ (40 - 10.8451) / 0.2471 \\ (80 - 21.2913) / 0.5111 \\ (60 - 14.4038) / 0.3221 \\ (100 - 29.3213) / 0.1746 \\ (-50 - 23.8480) / -0.0724 \\ (-50 - 23.8480) / -0.0724 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 117.9883 \\ 117.9883 \\ 114.8673 \\ 141.5591 \\ 404.8036 \\ 1020.00 \\ 1020.00 \end{bmatrix} \quad MVA$$

$$\Delta S_{T_{ji}} = \begin{bmatrix} (40 - 11.2546) / 0.2698 \\ (40 - 11.2546) / 0.2698 \\ (80 - 22.0951) / 0.5569 \\ (60 - 14.4038) / 0.3221 \\ (100 - 28.5301) / 0.1698 \\ (-50 - 23.2045) / -0.0705 \\ (-50 - 23.2045) / -0.0705 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 106.5434 \\ 106.5434 \\ 103.9772 \\ 141.5591 \\ 420.9064 \\ 1038.362 \\ 1038.362 \end{bmatrix} \quad MVA$$

$$\Delta S_V = \begin{bmatrix} (0.95 - 1.0118) / (-0.9678 \times 10^{-3}) \\ (0.95 - 1.0500) / 0 \\ (0.95 - 1.0500) / 0 \\ (0.95 - 1.0217) / (-0.0042 \times 10^{-3}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63.8562 \\ inf \\ inf \\ 17071.4 \end{bmatrix} \quad MVA$$

$$\Delta S_{P_G} = \begin{bmatrix} (200 - 88.5967) / 0.9950 \\ (200 - 108.2400) / 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 111.9634 \\ \text{inf} \end{bmatrix} \text{ MVA}$$

$$\Delta S_L = \min\{\Delta S_{T_v}, \Delta S_{T_m}, \Delta S_V, \Delta S_{P_G}\} = 63.8562 \text{ MVA}$$

ขั้นที่ 3

จากค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุด 63.8562 MVA (เมื่อเทียบกับคำตอบที่จากตัวอย่างที่ 3.1 แล้ว พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ 8.79%) รวมกันค่าโหลดในกรณีพื้นฐาน 42.72 MVA (40 MW, 15 MVAR) ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่คำนวณได้จากตัวอย่างนี้เท่ากับ 106.5762 MVA หรือ 99.7904 MW, 37.4214 MVAR

ตัวอย่างที่ 3.3 แสดงการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากบัสที่ 2 ไปยังบัสที่ 1 ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้นวิธีที่ 1 และลดเวลาในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.3.1 (กรณีที่ 1) ตามลำดับ

ขั้นที่ 1 คำนวณจุดทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเพิ่มโหลด ณ บัสที่ 1 แบบตัวประกอบกำลังคงที่ 10 MVA ด้วยสมการที่ (3.7) ซึ่งในที่นี้คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_4 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1035 & 0.0635 & 0.0754 & 0.0055 & 0.0012 \\ 0.0604 & 0.1528 & 0.0440 & -0.0409 & 0.0007 \\ 0.0740 & 0.0454 & 0.1213 & 0.0039 & -0.0095 \\ -0.0031 & 0.0560 & -0.0023 & 0.1220 & -0.0000 \\ 0.0006 & 0.0004 & 0.0180 & 0.0000 & 0.0714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{3, \text{mis}} \\ \Delta P_{1, \text{mis}} \\ \Delta P_{4, \text{mis}} \\ \Delta Q_{1, \text{mis}} \\ \Delta Q_{4, \text{mis}} \end{bmatrix}$$

เราจะคำนวณสมการนี้ซ้ำจนกระทั่งค่า $\max\{|\Delta P|, |\Delta Q|\}$ มีค่าน้อยกว่า 0.001 เพื่อความถูกต้องของคำตอบที่ได้ สำหรับตัวอย่างนี้ต้องคำนวณทั้งหมด 2 รอบ จากนั้นจะได้จุดทำงานของระบบหลังจากเพิ่มโหลด 10 MVA ณ บัสที่ 1

ขั้นที่ 2 จากจุดทำงาน ณ สภาวะโหลดพื้นฐาน และ สภาวะที่มีการเพิ่มโหลด ณ บัสที่ 1 นำคำตอบที่ได้ไปคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลของ กำลังไฟฟ้า แรงดัน และ กำลังการผลิตเทียบกับการเพิ่มของโหลด $(\frac{dS}{dS_L}, \frac{d|V|}{dS_L}, \frac{dP_G}{dS_L})$ เช่นเดียวกับขั้นที่ 1 ของตัวอย่างที่ 3.2 จากนั้นนำคำตอบที่ได้

ไปคำนวณค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเพื่อพิจารณาจากเงื่อนไขต่างๆ (เหมือนกับขั้นที่ 2 ของตัวอย่างที่ 3.2) และจากค่าโหลดเหล่านั้นค่าที่ต่ำที่สุด คือ 63.8839 MVA

ขั้นที่ 3

จากค่าโหลดที่สามารถเพิ่มได้สูงสุด 63.8839 MVA หรือ 59.8163 MW, 22.4311 MVAR MVA (เมื่อเทียบกับคำตอบที่จากตัวอย่างที่ 3.1 แล้วพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ 8.83%) รวมกับค่าโหลดในกรณีพื้นฐาน 40 MW, 15 MVAR คิดเป็นค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด 99.8163 MW, 37.4311 MVAR

ตัวอย่างที่ 3.4 แสดงการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากบัสที่ 2 ไปยังบัสที่ 1 เมื่อสายส่ง 1-3 เกิดการหลุดออก ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้นวิธีที่ 1 และลดเวลาในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.3.1 (กรณีที่ 2) ตามลำดับ

ขั้นที่ 1 คำนวณจุดทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดสายส่งชำรุด โดยที่ใช้ตัวแปรเริ่มต้นคือ จุดทำงานของระบบ ณ สภาวะโหลดพื้นฐาน ด้วยสมการที่ (3.7) โดยที่ J_0^{-1} คือเมตริกซ์ในตัวอย่างที่ 3.3 และ ΔJ ที่คำนวณได้จากภาคผนวก ก ซึ่งคือ

$$\Delta J = \begin{bmatrix} -4.3047 & 4.3047 & 0 & 1.9873 & 0 \\ 4.1914 & -4.1914 & 0 & -1.8360 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2.2373 & 2.2373 & 0 & -3.9519 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เราจะสามารถคำนวณ J_1^{-1} ได้โดยใช้วิธีของ Sherman-Morrison ซึ่งได้คำตอบคือ

$$J_1^{-1} = \begin{bmatrix} 0.1280 & 0.0000 & 0.0933 & -0.0000 & 0.0015 \\ 0.0000 & 0.2892 & 0.0000 & -0.0780 & 0.0000 \\ 0.0915 & 0.0000 & 0.1341 & -0.0000 & -0.0093 \\ -0.0000 & 0.1197 & -0.0000 & 0.3030 & -0.0000 \\ 0.0008 & 0.0000 & 0.0181 & -0.0000 & 0.0714 \end{bmatrix}$$

จาก J_1^{-1} ที่ได้เราจะนำไปแทนในสมการที่ (3.7) เพื่อใช้คำนวณจุดทำงานของระบบ เมื่อสายส่งชำรุด และเมื่อมีการเพิ่มโหลด ณ บัสที่ 1 จำนวน 10 MVA แบบตัวประกอบกำลังคงที่

ขั้นที่ 2 จากจุดทำงาน ณ สภาวะโหลดพื้นฐาน และ สภาวะที่มีการเพิ่มโหลด ณ บัสที่ 1 เมื่อสายส่ง 1-3 ขำรุด นำคำตอบที่ได้ไปคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลของกำลังไฟฟ้า แรงดัน และ กำลังการผลิตเทียบกับการเพิ่มของโหลด ($\frac{dS}{dS_L}, \frac{d|V|}{dS_L}, \frac{dP_G}{dS_L}$) เช่นเดียวกับขั้นที่ 1 ของตัวอย่างที่ 3.2 จากนั้นนำคำตอบที่ได้ไปคำนวณค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเพื่อพิจารณาจากเงื่อนไขต่างๆ (เหมือนกับขั้นที่ 2 ของตัวอย่างที่ 3.2) และจากค่าโหลดเหล่านี้ค่าที่ต่ำที่สุด คือ 1.9459 MVA

ขั้นที่ 3

จากค่าโหลดที่สามารถเพิ่มได้สูงสุด ณ บัสที่ 1 จำนวน 1.9459 MVA MVA (เมื่อเทียบกับคำตอบที่ความถูกต้องสูงพบว่ามีความคลาดเคลื่อน 17.14%) และค่าโหลดพื้นฐานจำนวน 42.72 MVA \therefore ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงส่ง จากบัส 2 ไปยังบัส 1 ณ สภาวะที่สายส่ง 1-3 เกิดการหลุดออกมีค่าเท่ากับ 44.6659 MVA หรือ 41.8220 MW, 15.6832 MVAR

3.4 การประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบเชิงเส้นวิธีที่ 2

3.4.1 การจัดรูปแบบปัญหา

เนื่องจากในที่นี้ต้องการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สามารถบอกผ่านค่าโหลดที่สามารถเพิ่มได้มากที่สุด ณ บัสผู้ซื้อเมื่อกำหนดให้บัสผู้ขายเป็น slack bus โดยที่ยังไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไข ดังนั้นจึงกำหนดค่าโหลด ณ บัสผู้ซื้อ (i) ให้เป็น

$$P_i = P_i^0 + \lambda K_{P_i} \quad (3.8)$$

$$Q_i = Q_i^0 + \lambda K_{Q_i} \quad (3.9)$$

โดยที่ P_i^0, Q_i^0 คือ ค่าโหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟ ณ บัสที่ i

K_{P_i}, K_{Q_i} คือ ค่าคงตัวที่ใช้บอกอัตราการเพิ่มของโหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟ ณ บัสที่ i

เมื่อ λ เปลี่ยนแปลง

จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) พบว่าปัญหาเรามีตัวเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัว คือ λ ดังนั้นสมการเพาเวอร์ไฟลว์ คือ

$$F(X, \lambda) = 0 \quad (3.10)$$

โดยที่

X คือ ตัวแปรสถานะของระบบประกอบด้วย ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้า

λ คือ ค่าตัวคูณโหลด

ซึ่ง $F(X, \lambda)$ ประกอบไปด้วย

$$\sum_{k=1}^N V_i V_k [g_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + b_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] - (P_{Gi} - P_{Li}) = 0, \forall i \in PQ, PV \quad (3.11)$$

$$\sum_{k=1}^N V_j V_k [g_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k) - b_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k)] - (Q_{Gj} - Q_{Lj}) = 0, \forall j \in PQ \quad (3.12)$$

โดยที่

V_i, V_k คือ ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ i และ k

δ_i, δ_k คือ ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ i และ k

g_{ik}, b_{ik} คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของตำแหน่งที่ (i,k) ของ Y_{bus}

P_{Gi}, Q_{Gi} คือ ค่ากำลังจริงและรีแอกทีฟที่ผลิตโดยบัสที่ i

P_{Li}, Q_{Li} คือ ค่าโหลดจริงและรีแอกทีฟโหลด ณ บัสที่ i

อย่างไรก็ดีสมการที่ (3.10) ก็ยังไม่สามารถจัดการกับปัญหาทั้งหมดในการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทั้งนี้เนื่องจากจำเป็นต้องพิจารณาเหตุการณ์ขัดข้องที่สำคัญ (contingency) ซึ่งในที่นี้กำหนดจากการเกิดสายส่งชำรุด ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดตัวแปรเพิ่มเติมดังนี้

$$g_{jk} = \mu g_{jk} \quad (3.13)$$

$$b_{jk} = \mu b_{jk} \quad (3.14)$$

โดยที่ μ คือ สถานะของสายส่งที่มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อกำลังใช้งานและมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ได้ใช้งาน ดังนั้นสมการเพาเวอร์โพลาร์ จึงเขียนใหม่ได้ คือ

$$F(X, \lambda, \mu) = 0 \quad (3.15)$$

3.4.2 การคำนวณค่า $\partial X / \partial \lambda$ ในสภาวะปกติ

ในสภาวะปกติสายส่งทุกเส้นจะอยู่ในสภาวะใช้งานได้ดังนั้นค่า $\mu = 1$ และค่าโหลดในกรณีพื้นฐาน $\lambda = 0$ เราจะได้สมการเพาเวอร์โพลาร์ เป็น

$$F(X^0, \lambda^0, \mu^0) = 0 \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.16) ทำการคำนวณค่าอนุพันธ์ โดยคิดว่า μ เป็นค่าคงที่ (เท่ากับ 1) จะได้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \delta} & \frac{\partial F_1}{\partial V} & \frac{\partial F_1}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \delta} & \frac{\partial F_2}{\partial V} & \frac{\partial F_2}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \underline{0} \quad (3.17)$$

โดยที่

F_1 คือ $F(X, \lambda, \mu)$ ในส่วนที่ประกอบด้วยสมการที่ (3.12) ของบัส PV และ PQ

F_2 คือ $F(X, \lambda, \mu)$ ในส่วนที่ประกอบด้วยสมการที่ (3.13) ของบัส PQ

ดังนั้นสมการที่ (3.17) จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \underline{0} \quad (3.18)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \text{ คือ เมตริกซ์ Jacobian ของการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ ด้วยวิธี Newton-}$$

Raphson

$\frac{\partial P}{\partial \lambda}$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ยกเว้นตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับบัสผู้ซื้อ จะมีค่าเป็น K_{Pi}

$\frac{\partial Q}{\partial \lambda}$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ยกเว้นตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับบัสผู้ซื้อ จะมีค่าเป็น K_{Qi}

จากสมการที่ (3.18) เราจะสามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของ δ_i และ V_i ณ ค่าโหลดในกรณีพื้นฐานได้จาก

$$\frac{\partial X^0}{\partial \lambda} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial V}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = -1 \times \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.4.3 การคำนวณค่า $\partial X/\partial \lambda$ ในสภาวะเกิดสายส่งชำรุด

วิธีในการคำนวณแยกออกได้เป็น 2 วิธี คือ

- 1) การคำนวณที่พิจารณาว่าการชำรุดของสายส่งเป็นสภาวะพื้นฐานและทำการคำนวณ $\partial X/\partial \lambda$ ด้วยวิธีการเดียวกับในสภาวะปกติ วิธีนี้มีข้อดี คือ ง่ายต่อการทำความเข้าใจ แต่มีข้อเสีย คือ จำเป็นต้องทำการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ใหม่ทุกรอบการคำนวณเหตุขัดข้อง
- 2) การคำนวณ $\partial X/\partial \lambda$ โดยอาศัยการประมาณค่าตัวแปรสถานะ X ณ สภาวะเกิดเหตุขัดข้อง จากตัวแปรสถานะในกรณีที่ไม่เกิดเหตุขัดข้อง X^0 วิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถคำนวณได้รวดเร็ว เนื่องจาก

คำนวณเพาเวอร์โพล์เพียง 1 ครั้งต่อการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1 เส้นทาง แต่มีข้อเสียคือ ค่าตอบที่ได้ในบางกรณีมีความผิดพลาดสูงทั้งนี้เนื่องจาก ความผิดพลาดเกิดจากทั้งการผิดพลาดเนื่องจากการประมาณ X และ ความผิดพลาดเนื่องจากการประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด ด้วยวิธีแบบเชิงเส้น

เนื่องจากวิธีที่ 1 มีการคำนวณเหมือนกับ การคำนวณ $\partial X/\partial \lambda$ ในภาวะปกติดังนั้นในที่นี้จะอธิบายเฉพาะรายละเอียดการคำนวณสำหรับวิธีที่ 2 ซึ่งจะเริ่มต้นจากการประมาณตัวแปรสถานะ X ณ สภาวะเกิดเหตุขัดข้อง ในที่นี้เราจะใช้ข้อมูล X^0 และสมการที่ (3.13)-(3.14) ในการประมาณ X ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะเมื่อพิจารณาว่าสายส่ง $j-k$ ขาด โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาระบบในสภาวะพื้นฐาน

$$F(X^0, \lambda^0, \mu^0) = 0 \quad (3.20)$$

และพิจารณาว่าโหลดในระบบยังมีค่าคงที่ ($\lambda = 0$) ดังนั้น เมื่อคำนวณค่าอนุพันธ์สมการที่ (3.20) จะได้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \delta} & \frac{\partial F_1}{\partial V} & \frac{\partial F_1}{\partial \mu} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \delta} & \frac{\partial F_2}{\partial V} & \frac{\partial F_2}{\partial \mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\mu \end{bmatrix} = \underline{0} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \delta} & \frac{\partial F_1}{\partial V} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \delta} & \frac{\partial F_2}{\partial V} \end{bmatrix} \text{ คือ เมตริกซ์ Jacobian ของการคำนวณเพาเวอร์โพล์ ด้วยวิธี Newton-Raphson}$$

$\frac{\partial F_1}{\partial \mu}$ จะมีค่าเป็น 0 ยกเว้นตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับบัส $j-k$ (ปลายสองข้างของสายส่ง) มีค่า

$$\text{เป็น } \frac{\partial P_{jk}}{\partial \mu} \text{ และ } \frac{\partial P_{kj}}{\partial \mu} \text{ ตามลำดับ}$$

$\frac{\partial F_2}{\partial \mu}$ จะมีค่าเป็น 0 ยกเว้นตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับบัส $j-k$ (ปลายสองข้างของสายส่ง) มีค่า

$$\text{เป็น } \frac{\partial Q_{jk}}{\partial \mu} \text{ และ } \frac{\partial Q_{kj}}{\partial \mu} \text{ ตามลำดับ}$$

ซึ่งค่า $\frac{\partial P_{jk}}{\partial \mu}$, $\frac{\partial P_{kj}}{\partial \mu}$, $\frac{\partial Q_{jk}}{\partial \mu}$ และ $\frac{\partial Q_{kj}}{\partial \mu}$ คือ

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \mu} = V_j V_k [g_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k) + b_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k)] \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial P_{kj}}{\partial \mu} = V_j V_k [g_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k) + b_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k)] \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial Q_{jk}}{\partial \mu} = V_j V_k [g_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k) - b_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k)] \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial Q_{kj}}{\partial \mu} = V_j V_k [g_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k) - b_{jk} \cos(\delta_k - \delta_j)] \quad (3.25)$$

อธิบายทางกายภาพได้ดังนี้ $\frac{\partial P_{jk}}{\partial \mu}$ และ $\frac{\partial Q_{jk}}{\partial \mu}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งออกจากปลายสายส่งด้าน j และ

$\frac{\partial P_{kj}}{\partial \mu}$ และ $\frac{\partial Q_{kj}}{\partial \mu}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งออกจากปลายสายส่งด้าน k (ถ้าเป็นการรับกำลังไฟฟ้าเครื่อง-

หมายจะติดลบ) ดังนั้นจากสมการที่ (3.21) จะได้

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \end{bmatrix} = -1 \times \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \mu} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \mu} \end{bmatrix} \cdot d\mu \quad (3.26)$$

โดยที่ $d\mu$ มีค่าเป็น -1 ซึ่งมาจากการที่ $\mu = 1$ ในกรณีสายส่งปกติและ $\mu = 0$ เมื่อสายส่งชำรุดผลจากสมการที่ (3.26) จะได้ X เมื่อพิจารณาว่าสายส่ง j-k ชำรุด ซึ่งคือ

$$X = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^0 \\ V^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

จากค่า X ที่ได้ เราจะคำนวณสมการที่ (3.19) ขึ้นเพื่อคำนวณ $\frac{\partial X}{\partial \lambda}$ อย่างไม่ยาก การคำนวณสมการที่ (3.19) จะต้องระวังตรงประเด็นที่ว่า ค่า $\frac{\partial P}{\partial \delta}$, $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{\partial Q}{\partial \delta}$ และ $\frac{\partial Q}{\partial V}$ มีค่าไม่เท่าเดิมเนื่องจากผลของการที่ X และ Y_{bus} มีค่าเปลี่ยนไป

3.4.4 การประมาณค่าโหลดที่สามารถเพิ่มได้มากที่สุด สำหรับแต่ละเงื่อนไข

ในขณะนี้การคำนวณค่า TTC พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดด้านพิกัดสายส่ง ขนาดของแรงดันไฟฟ้า และค่าพิกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดสำหรับเงื่อนไขแต่ละเงื่อนไข สามารถประมาณด้วยวิธีเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\Delta\lambda_{V_i} = (V_{limit} - V_i^0) / (\partial V_i / \partial \lambda), \forall i \in PQ \quad (3.28)$$

$$\Delta\lambda_S = \begin{cases} (S_{limit,jk} - S_{jk}^0) / (\partial S_{jk} / \partial \lambda); \partial S_{jk} / \partial \lambda > 0 \\ (-S_{limit,jk} - S_{jk}^0) / (\partial S_{jk} / \partial \lambda); \partial S_{jk} / \partial \lambda < 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

$$\Delta\lambda_G = (P_{G,limit} - P_G^0) / (\partial P_G / \partial \lambda) \quad (3.30)$$

โดย

V_{limit} คือ ค่าขอบเขตขนาดแรงดันไฟฟ้า ในหน่วย p.u.

$S_{limit,jk}$ คือ ค่าพิกัดอนุกรมของสายส่ง j-k ในหน่วย MVA

$P_{G,limit}$ คือ ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผู้ขาย ในหน่วย MW

V_i^0 คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า ณ บัส i ที่สภาวะโหลดพื้นฐาน

S_{jk}^0 คือ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปรากฏจากบัส j ไปยังบัส k ณ สภาวะโหลดพื้นฐาน

P_G^0 คือ กำลังการผลิต ณ ผู้ขายในสภาวะโหลดพื้นฐาน

ในสมการที่ (3.28) ค่า $\partial V_i / \partial \lambda$ สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (3.19) ดังนั้นจะไม่ขอกล่าวรายละเอียดในที่นี้ แต่สำหรับค่า $\partial S_{jk} / \partial \lambda$ และ $\partial P_G / \partial \lambda$ ในขณะนี้ยังไม่ทราบดังนั้นในส่วนถัดไปจะแสดงรายละเอียดการคำนวณค่าดังกล่าว

3.4.5 การคำนวณค่า $\partial S_{jk} / \partial \lambda$

เนื่องจาก

$$S_{jk} = \sqrt{P_{jk}^2 + Q_{jk}^2} \quad (3.31)$$

$$\text{เมื่อ } P_{jk} = V_j^2 g_{jk} - V_j V_k y_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.32)$$

$$Q_{jk} = -V_j^2 b_{jj} - V_j^2 b_{jk} - V_j V_k y_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.33)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial S_{jk}}{\partial \lambda} = \frac{\partial S_{jk}}{\partial V_j} \cdot \frac{\partial V_j}{\partial \lambda} + \frac{\partial S_{jk}}{\partial V_k} \cdot \frac{\partial V_k}{\partial \lambda} + \frac{\partial S_{jk}}{\partial \delta_j} \cdot \frac{\partial \delta_j}{\partial \lambda} + \frac{\partial S_{jk}}{\partial \delta_k} \cdot \frac{\partial \delta_k}{\partial \lambda} \quad (3.34)$$

โดยที่

$\frac{\partial V_j}{\partial \lambda}, \frac{\partial V_k}{\partial \lambda}, \frac{\partial \delta_j}{\partial \lambda}$ และ $\frac{\partial \delta_k}{\partial \lambda}$ เป็นค่าที่ได้จากสมการที่ (3.19) แต่สำหรับค่าอื่นๆ นั้นสามารถ

คำนวณได้ดังนี้

$$\frac{\partial S_{jk}}{\partial V_j} = \frac{1}{S_{jk}} \cdot \left[P_{jk} \cdot \frac{\partial P_{jk}}{\partial V_j} + Q_{jk} \cdot \frac{\partial Q_{jk}}{\partial V_j} \right] \quad (3.35)$$

โดยที่

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial V_j} = 2V_j g_{jk} - V_k y_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial Q_{jk}}{\partial V_j} = -2V_j b_{jj} - 2V_j b_{jk} - V_k y_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial S_{jk}}{\partial V_k} = \frac{1}{S_{jk}} \cdot \left[P_{jk} \cdot \frac{\partial P_{jk}}{\partial V_k} + Q_{jk} \cdot \frac{\partial Q_{jk}}{\partial V_k} \right] \quad (3.38)$$

โดยที่

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial V_k} = -V_j y_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial Q_{jk}}{\partial V_k} = -V_j y_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial S_{jk}}{\partial \delta_j} = \frac{1}{S_{jk}} \cdot \left[P_{jk} \cdot \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_j} + Q_{jk} \cdot \frac{\partial Q_{jk}}{\partial \delta_j} \right] \quad (3.41)$$

โดยที่

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_j} = V_j V_k y_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial Q_{jk}}{\partial \delta_j} = -V_j V_k y_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial S_{jk}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{S_{jk}} \cdot \left[P_{jk} \cdot \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_k} + Q_{jk} \cdot \frac{\partial Q_{jk}}{\partial \delta_k} \right] \quad (3.44)$$

โดยที่

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_k} = -\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_j} = -V_j V_k y_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial Q_{jk}}{\partial \delta_k} = -\frac{\partial Q_{jk}}{\partial \delta_j} = V_j V_k y_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k + \theta_{jk}) \quad (3.46)$$

3.4.6 การคำนวณค่า $\partial P_G / \partial \lambda$

เนื่องจาก

$$P_{Gi} = \sum_{k=1}^N V_i V_k [g_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + b_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] + P_{Li} \quad (3.47)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \lambda} = \frac{\partial P_{Gi}}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \lambda} \quad (3.48)$$

โดยที่

$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V}$ และ $\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta}$ คือเวกเตอร์แถวของอนุพันธ์ในเมตริกซ์ Jacobian ณ แกวที่สอดคล้องกับค่า P_{Gi}

$\frac{\partial V}{\partial \lambda}$ และ $\frac{\partial \delta}{\partial \lambda}$ คือเวกเตอร์ที่บอกการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะเทียบกับการ

เปลี่ยนแปลงตัวควบคุมโหลด λ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.19)

ตัวอย่างที่ 3.5 แสดงการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากบัสที่ 2 ไปยังบัสที่ 1 ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้นวิธีที่ 2 ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4

ขั้นที่ 1 คำนวณเพาเวอร์โฟลว์ เพื่อคำนวณจุดทำงานของระบบ ณ ค่าโหลดพื้นฐาน และเมตริกซ์ Jacobian J_0

ขั้นที่ 2 คำนวณ $\frac{\partial X^0}{\partial \lambda}$ ตามสมการที่ (3.19) ซึ่งในที่นี้คือ

$$\begin{bmatrix} \partial \delta_3 / \partial \lambda \\ \partial \delta_1 / \partial \lambda \\ \partial \delta_4 / \partial \lambda \\ \partial V_1 / \partial \lambda \\ \partial V_4 / \partial \lambda \end{bmatrix} = -1 \times \begin{bmatrix} 0.1035 & 0.0635 & 0.0754 & 0.0055 & 0.0012 \\ 0.0604 & 0.1528 & 0.0440 & -0.0409 & 0.0007 \\ 0.0740 & 0.0454 & 0.1213 & 0.0039 & -0.0095 \\ -0.0031 & 0.0560 & -0.0023 & 0.1220 & -0.0000 \\ 0.0006 & 0.0004 & 0.0180 & 0.0000 & 0.0714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.40 \\ 0 \\ 0.15 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -2.6218 \\ -5.5004 \\ -1.8741 \\ -4.0706 \\ -0.0160 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$$

เนื่องจากบัส 2 เป็น slack bus และบัส 3 เป็น บัส PV ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลง V_2 , δ_2 และ V_3 มีค่าเท่ากับศูนย์

ขั้นที่ 3 คำนวณค่า $\frac{\partial S_{jk}}{\partial \lambda}$ และ $\frac{\partial P_G}{\partial \lambda}$

เริ่มต้นจากการคำนวณ $\frac{\partial S_{jk}}{\partial V_j}$, $\frac{\partial S_{jk}}{\partial V_k}$, $\frac{\partial S_{jk}}{\partial \delta_j}$ และ $\frac{\partial S_{jk}}{\partial \delta_k}$ ด้วยสมการที่ (3.35)-(3.46) ผลลัพธ์ที่ได้

รวมกับค่า $\frac{\partial V_j}{\partial \lambda}$, $\frac{\partial V_k}{\partial \lambda}$, $\frac{\partial \delta_j}{\partial \lambda}$ และ $\frac{\partial \delta_k}{\partial \lambda}$ จากขั้นที่ 2 จะสามารถคำนวณ $\frac{\partial S_{jk}}{\partial \lambda}$ ได้ตามสมการที่ (3.34)

สำหรับค่า $\frac{\partial P_G}{\partial \lambda}$ คำนวณได้จากสมการที่ (3.48) เมื่อคำนวณขั้นที่ 3 เสร็จสิ้นเราทราบ $\frac{dS_{ij}}{dS}$, $\frac{dS_{ji}}{dS}$,

$\frac{dV}{dS}$ และ $\frac{dP_G}{dS}$ เหมือนกับการคำนวณขั้นที่ 1 ของตัวอย่างที่ 3.2

ขั้นที่ 4 คำนวณค่าโหลดที่สามารถเพิ่มได้มากที่สุดด้วยวิธีการเดียวกับขั้นที่ 2 ของตัวอย่างที่ 3.2 ซึ่งในที่นี้ได้ค่าคือ $\lambda = 1.5181$ ($1\lambda = \sqrt{40^2 + 15^2} = 42.72$ MVA) หรือ 64.8574 MVA (เมื่อเทียบกับคำตอบที่จากตัวอย่างที่ 3.1 แล้วพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ 10.49%) เมื่อรวมกับค่าโหลดในกรณีพื้นฐานจำนวน 42.72 MVA จะได้ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 107.5771 MVA หรือ 100.7278 MW, 37.7729 MVAR

ตัวอย่างที่ 3.6 แสดงการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากบัสที่ 2 ไปยังบัสที่ 1 เมื่อสายส่ง 1-3 ชำรุด ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้นวิธีที่ 2 ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4

ขั้นที่ 1 คำนวณเพาเวอร์โพลาร์ เพื่อคำนวณจุดทำงานของระบบ ณ ค่าโหลดพื้นฐาน และเมตริกซ์

Jacobian J_0

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าจากสมการที่ (3.26) และ (3.27)

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_4 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} = -1 \times \begin{bmatrix} 0.1035 & 0.0635 & 0.0754 & 0.0055 & 0.0012 \\ 0.0604 & 0.1528 & 0.0440 & -0.0409 & 0.0007 \\ 0.0740 & 0.0454 & 0.1213 & 0.0039 & -0.0095 \\ -0.0031 & 0.0560 & -0.0023 & 0.1220 & -0.0000 \\ 0.0006 & 0.0004 & 0.0180 & 0.0000 & 0.0714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1942 \\ -0.1898 \\ 0 \\ -0.0964 \\ 0 \end{bmatrix} \times (-1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_3 \\ \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_4 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.007520 \\ -0.013332 \\ 0.005375 \\ -0.023010 \\ 0.000045 \end{bmatrix} \quad \text{ดังนั้นจะได้} \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9888 \angle -3.8774^\circ \\ 1.0500 \angle 0.0^\circ \\ 1.0500 \angle -1.1553^\circ \\ 1.0217 \angle -3.3057^\circ \end{bmatrix}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณ $\frac{\partial X^0}{\partial \lambda}$ ตามสมการที่ (3.19) ซึ่งในที่นี้คือ

$$\begin{bmatrix} \partial\delta_3/\partial\lambda \\ \partial\delta_1/\partial\lambda \\ \partial\delta_4/\partial\lambda \\ \partial V_1/\partial\lambda \\ \partial V_4/\partial\lambda \end{bmatrix} = -1 \times \begin{bmatrix} 0.1277 & 0 & 0.0930 & 0 & 0.0013 \\ 0 & 0.2985 & 0 & -0.0748 & 0 \\ 0.0913 & 0 & 0.1339 & 0 & -0.0094 \\ 0 & 0.1301 & 0 & 0.3169 & 0 \\ 0.0006 & 0 & 0.0179 & 0 & 0.0714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.40 \\ 0 \\ 0.15 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \partial\delta_3/\partial\lambda \\ \partial\delta_1/\partial\lambda \\ \partial\delta_4/\partial\lambda \\ \partial V_1/\partial\lambda \\ \partial V_4/\partial\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1082 \\ 0 \\ -0.0996 \\ 0 \end{bmatrix}$$

เนื่องจากบัส 2 เป็น slack bus และบัส 3 เป็น บัส PV ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลง V_2, δ_2 และ V_3 มีค่าเท่ากับศูนย์

ขั้นที่ 4

คำนวณเหมือนกับขั้นที่ 3 และขั้นที่ 4 ของตัวอย่างที่ 3.5 ซึ่งในตัวอย่างนี้ค่าโหลดที่สามารถเพิ่มได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ ณ บัสที่ 1 จำนวน 1.9459 MVA MVA (เมื่อเทียบกับคำตอบที่ความถูกต้องสูงพบว่ามีความคลาดเคลื่อน 17.14%) และค่าโหลดพื้นฐานจำนวน 42.72 MVA \therefore ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสูง จากบัส 2 ไปยังบัส 1 ณ สภาวะที่สายส่ง 1-3 เกิดการหลุดออกมีค่าเท่ากับ 44.6659 MVA หรือ 41.8220 MW, 15.6832 MVAR

3.5 การวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของวิธีการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ การพัฒนาวิธีการกำหนดความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นการเข้าใจถึงข้อดีและข้อเสียของวิธีการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจึงเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในส่วนถัดไปสำหรับการหาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า ดังนั้นในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ถึงข้อดีและข้อเสียของวิธีการคำนวณแต่ละวิธีไปดังนี้

การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ [4]

จากรายละเอียดในการคำนวณที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.2 เราจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าวิธีการนี้เป็นวิธีการที่อาศัยการคำนวณเพาเวอร์โพลว์เป็นพื้นฐานดังนั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีนี้จะสูง แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่การคำนวณไม่ซับซ้อนและไม่ได้รับผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ ดังนั้นวิธีการนี้จึงสามารถคำนวณคำตอบได้ตามความละเอียดที่ต้องการ ด้วยเหตุผลดังกล่าววิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะใช้คำนวณคำตอบเพื่อเป็นคำตอบอ้างอิงสำหรับวิธีการคำนวณวิธีอื่นๆ

การประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบเชิงเส้นวิธีที่ 1 [4]

จากรายละเอียดในการคำนวณที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3 เราจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่อาศัยข้อสมมติฐานที่ว่าระบบไฟฟ้ากำลังมีลักษณะเป็นเชิงเส้นในช่วงที่พิจารณาและทำการประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยสมการที่ (3.1)-(3.5) ซึ่งเมื่อวิเคราะห์วิธีการนี้แล้วพบว่าข้อเสียหลัก อยู่ 3 ประการดังนี้

ประการที่ 1 คือ วิธีนี้จำเป็นต้องทราบจุดทำงานของระบบสองจุดเพื่อใช้ในการประมาณค่า $\frac{dS_{jk}}{dS_L}, \frac{dV_i}{dS_L}, \frac{dP_G}{dS_L}$ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องคำนวณเพาเวอร์โพลว์สองครั้งต่อหนึ่งการประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อแก้ปัญหาให้ผู้ทำวิจัยจึงได้เสนอวิธีการลดเวลาในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ไว้ในข้อที่ 3.3.1

ถึงแม้ว่าข้อเสียที่หนึ่งจะถูกแก้ไขแล้ว อย่างไรก็ตาม ข้อเสียอีกประการหนึ่งที่สำคัญก็คือ ส่วนการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลของ กำลังไฟฟ้า แรงดัน และ กำลังการผลิตเทียบกับการเพิ่มของโหลด $(\frac{dS_{jk}}{dS_L}, \frac{dV_i}{dS_L}, \frac{dP_G}{dS_L})$ ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของโหลดที่เพิ่มขึ้น ณ บัส ผู้ซื้อก่อนที่จะมีการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ครั้งที่สอง ค่าดังกล่าวนี้ในทางปฏิบัติเลือกได้ค่อนข้างยาก และการเลือกค่าที่แตกต่างกันทำให้ คำตอบที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกันด้วย

สำหรับข้อเสียประการสุดท้ายก็คือ จากประสบการณ์ของผู้ทำวิจัยพบว่าโดยทั่วไปวิธีดังกล่าวสามารถให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ของค่าที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตาม ในบางครั้ง

ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้อาจเพิ่มขึ้นถึง $\pm 20\%$ จากที่ได้อธิบายมาทั้งหมดข้อเสียประการที่ 2 เป็นข้อเสียที่แก้ไขได้ยาก ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวิธีที่ใช้เป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งในการหาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า

การประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบเชิงเส้นวิธีที่ 2

จากรายละเอียดในการคำนวณที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.4 เราจะสามารถสังเกตได้ว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่อาศัยข้อสมมติฐานที่ว่า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสถานะของระบบมีค่าคงที่และเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลง ณ จุดที่ใช้เริ่มการคำนวณ และใช้ค่าดังกล่าวในการประมาณค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดสำหรับแต่ละเงื่อนไข ด้วยสมการที่ (3.28)-(3.30) การวิเคราะห์วิธีการนี้จะแยกออกเป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีที่การคำนวณค่า $\partial X/\partial \lambda$ ใช้จุดทำงานที่ได้จากคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ใหม่ทุก ๆ รอบการคำนวณเหตุขัดข้อง

กรณีนี้มีข้อดีคือ อาศัยการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์หนึ่งครั้งต่อหนึ่งสภาวะระบบ ส่วนข้อเสียที่พบคือ จากประสบการณ์ของผู้ทำวิจัยพบว่าโดยทั่วไปวิธีดังกล่าวสามารถให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ของค่าที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามในการคำนวณบางครั้งค่าความคลาดเคลื่อนอาจเพิ่มขึ้นถึง $\pm 20\%$ ได้ ถึงแม้ว่าความผิดพลาดจากการคำนวณของวิธีนี้จะมีค่าสูง วิธีนี้ก็สามารถปรับปรุงได้โดยอาศัยการคำนวณเพิ่มเติมซึ่งจะได้มีการอธิบายในบทที่ 5 ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เลือกใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งในการหาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า

2. กรณีที่การคำนวณค่า $\partial X/\partial \lambda$ ใช้จุดทำงานที่ได้จากสมการที่ (3.26) – (3.27) เมื่อพิจารณาเหตุขัดข้อง

กรณีนี้มีข้อดีคือ อาศัยการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์หนึ่งครั้งต่อหนึ่งเส้นทางการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น หากพิจารณาเหตุขัดข้องทั้งหมด 100 เหตุการณ์ วิธีนี้จะคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ 1 ครั้ง แต่ถ้าคำนวณแบบกรณีที่หนึ่งจะต้องคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ 100 ครั้งวิธีการนี้ถือว่าเป็นวิธีที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของวิธีนี้ก็คือ จากประสบการณ์ของผู้ทำวิจัยพบว่าคำตอบมีความคลาดเคลื่อนมากในระดับไม่สามารถยอมรับได้ (บางกรณีมากกว่า 50 %) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากวิธีนี้ใช้การประมาณสองส่วน ก็คือ ส่วนที่ใช้ประมาณจุดทำงาน และ ส่วนที่ใช้ประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากข้อมูลที่ใช้คำนวณในส่วนที่สองเป็นผลลัพธ์ของวิธี ด้วยเหตุนี้ความผิดพลาดจึงมีค่าสูงมาก จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการหาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า