

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้า

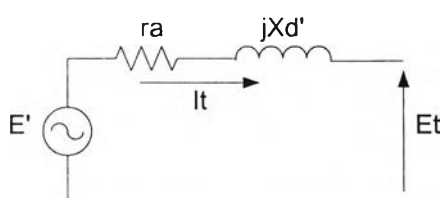
4.1 บทนำ

จุดประสงค์ของการศึกษาเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าก็คือเมื่อระบบกำลังไฟฟ้าถูกรบกวนแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุก ๆ ตัวในระบบกำลังไฟฟ้าจะยังคงเกาะกลุ่มกันทางความถี่ได้หรือไม่ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในสภาวะปกติจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ความถี่เดียวกันตลอดเช่น 50 Hz หรือ 60 Hz เป็นต้น หากเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้าเช่น เกิดฟอลต์ที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนไป และยังทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอื่นมีความถี่เปลี่ยนไปด้วยเนื่องจากเกิดกำลังเร่งหรือหน่วง การเปลี่ยนแปลงความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวที่กล่าวมานี้จะทำให้ความถี่ของระบบกำลังไฟฟ้าไม่เป็นอย่างเดียว ดังนั้นเราจะสนใจว่าเมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวแล้วเครื่องกำเนิดทุกตัวจะกลับมามีความถี่เท่ากันทุกตัวได้เหมือนเดิมหรือไม่ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดกลับมามีความถี่ใกล้เคียงที่เดิมไม่ได้แสดงว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนั้นสูญเสียเสถียรภาพ ในขณะที่เดียวกันหากเวลาผ่านไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่เหลืออาจจะสูญเสียเสถียรภาพก็เป็นได้เนื่องจากต้องจ่ายกำลังมากขึ้นกว่าปกติมาก ดังนั้นหากหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหลืออยู่สูญเสียเสถียรภาพไปอีกผลสุดท้ายก็คือระบบกำลังไฟฟ้าจะสูญเสียเสถียรภาพ

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าเราไม่ได้สนใจแต่ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวแต่เรายังสนใจศักดาไฟฟ้าที่บัส ,การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง หม้อแปลง ,การทำงานของรีเลย์ตลอดช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากระบบกำลังไฟฟ้ามีทั้งระบบผลิต ,ระบบส่ง และระบบจำหน่ายในส่วนของระบบผลิตนั้นเราจะสนใจความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งไม่ได้หมายความว่าหากเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้าแล้วเราจะศึกษาแต่ความถี่เพียงอย่างเดียว เพราะความถี่จะบอกถึงความมีเสถียรภาพของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และความมีเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้า แต่ในส่วนของระบบส่งนั้นศักดาไฟฟ้าในแต่ละบัส และการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเป็นสิ่งสำคัญจะต้องถูกนำมาพิจารณาด้วย เนื่องจกศักดาไฟฟ้าที่ระบบจำหน่ายจะต้องอยู่ในเกณฑ์ปกติเสมอ หากเราศึกษาแต่เพียงความถี่อย่างเดียวอาจเป็นไปได้ว่าระบบมีเสถียรภาพแต่ศักดาไฟฟ้าบางบัสไม่อยู่ในเกณฑ์ หรือบางสายส่งมีการไหลของกำลังไฟฟ้าสูงเกินไปซึ่งในลักษณะนี้แม้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพแต่ถือว่าไม่อยู่ในสภาวะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ปกติ

4.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ระบบกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติเราไม่ได้สนใจข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่าไรนักสนใจแต่เพียงว่าจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าออกมาเท่าไรซึ่งก็เป็นข้อมูลที่เพียงพอแล้วสำหรับการวิเคราะห์ระบบในสภาวะปกติ แต่ในเรื่องเสถียรภาพนั้นเราจะต้องหาจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อดูพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลง แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับว่าจะสนใจพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างละเอียดเพียงใดในที่นี้จะใช้แบบจำลองชนิด Classical Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีตัวแปรน้อยและมีความถูกต้องในการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับแบบจำลองอื่นในช่วงการแกว่งครั้งแรก (First Swing) หรือไม่เกิน 1 วินาที โดยประมาณ [3,5]



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นแบบ Classical Model ดังรูปที่ 4.1 นี้มีสมมุติฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพดังนี้

- 1 กำลังทางกล (P_m) จาก Governor ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการพิจารณา
- 2 ขนาดของ E' คงที่ตลอดช่วงการพิจารณา และไม่คิดผลของ Excitation System
- 3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.1 โดย

$$X_d' = \text{Transients Reactance}$$

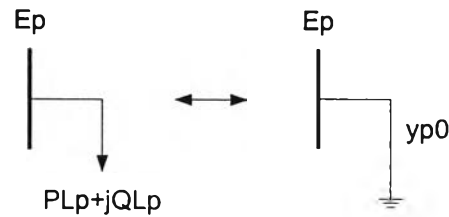
$$r_a = \text{Armature Resistance}$$

$$E' = \text{Voltage Back of Transient Reactance (Internal Voltage)}$$

$$I_t = \text{Machine Terminal Current}$$

$$E_t = \text{Machine Terminal Voltage}$$

- 4 ไม่คิดผลของ Damping หรือ Asynchronous Power
- 5 ใช้ศักดาไฟฟ้าที่บันทึกก่อนเกิดฟอลต์ในการจำลองโหลดด้วยแอดมิตแตนซ์ซึ่งคงที่ตลอดช่วงการพิจารณาดังรูปที่ 4.2 ในส่วนของสายส่งและหม้อแปลงนั้นแบบจำลองจะเหมือนกับที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของโหลด

4.3 สมการสวิง

พิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ในสภาวะปกติความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ω) จะหมุนด้วยความเร็วคงที่ดังนั้นในสมการที่ 4.1 มุมของโรเตอร์ (δ) จะคงที่ด้วย แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นมุมของโรเตอร์จะเปลี่ยนไปตามเวลานั้นคือ

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi f = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (4.1)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (4.2)$$

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วห่างออกไปจากความเร็วซิงโครนัสเท่าไรจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ต่อเวลา และเมื่อความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าห่างไปจากความเร็วซิงโครนัสแล้วอัตราการออกห่างไปนี้เทียบกับเวลาจะเป็นไปตามสมการที่ 4.2 ในสภาวะปกติ $\frac{d\omega}{dt} = 0$ เนื่องจากเกิดความสมดุลทางกำลังไฟฟ้า $P_m = P_e$ หรือระบบมีความถี่ที่ปกตินั่นเอง แต่เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบย่อมเสียสมดุลทางกำลังไฟฟ้าทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดกำลังเร่ง ($P_m > P_e$) และเกิดความถี่เกิน (Overfrequency) ในระบบ และกรณีเกิดกำลังหน่วง ($P_m < P_e$) หรือความถี่ต่ำ (Underfrequency) เป็นผลให้มุมของโรเตอร์เปลี่ยนไปด้วยดังนั้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพเราจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของมุมและความเร็วของโรเตอร์ของทุก ๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบต่อความผิดปกติในระบบ และจะนำไปสรุปผลว่าระบบจะมีเสถียรภาพหรือไม่

4.4 อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Exciter Action and Governor Action)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ต่อเวลาในสมการที่ 4.1 จะทำให้เกิด Exciter Action เนื่องจากมุมของโรเตอร์ที่เปลี่ยนไปทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายหรือรับเปลี่ยนไปทำให้ศักดาไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่คงที่ดังนั้นชุด Exciter จะทำการแก้ปัญหาด้วยการพยายามรักษาระดับศักดาไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ [2,4]

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเวลาในสมการที่ 4.2 จะทำให้เกิด Governor Action เนื่องจากความเร็วของโรเตอร์ที่เปลี่ยนไปทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (P) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายหรือรับเปลี่ยนไปทำให้สมดุลทางกำลังไฟฟ้าหรือความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่คงที่ดังนั้นชุด Governor จะทำการแก้ปัญหาด้วยการพยายามรักษาสมดุลทางกำลังไฟฟ้าหรือความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าหากเราไม่คิดผลของ Governor Action และ Exciter Action (สมมติฐานที่ 1 และ 2) ซึ่งเรียกว่า Unregulate System ผลที่ได้จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงในช่วงการแกว่งครั้งแรก (First Swing) หรือไม่เกิน 1 วินาทีโดยประมาณ ซึ่งในการศึกษาการทำงานของรีเลย์วัดระยะทางเราสนใจช่วงการแกว่งครั้งแรกเป็นพิเศษ

4.5 แบบจำลองของโหลดและสมการที่ใช้แสดงระบบส่ง

ในสภาวะปกติที่โหลดเราสนใจค่า P ,Q ที่โหลดได้รับ และไม่มีผลต่อ Y_{bus} แต่ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าเราจะจำลองโหลดด้วยแอดมิตแตนซ์โดยกระแสที่โหลดในสภาวะปกติคือ

$$I_{p0} = \frac{P_{LP} - jQ_{LP}}{E_p} \quad (4.3)$$

โดยศักดาไฟฟ้าในสภาวะปกติคือ E_p ดังนั้นค่าแอดมิตแตนซ์ของโหลดคือ

$$y_{p0} = \frac{I_{p0}}{E_p} \quad (4.4)$$

$$y_{p0} = g_{p0} - jb_{p0} \quad (4.5)$$

ในการหาศักดาไฟฟ้าที่บัสใด ๆ ในสภาวะปกติโดยวิธีของเกาส์-ไซเดล เป็นไปตามสมการที่ 4.6

$$E_p = \frac{(P_p - jQ_p)L_p}{E_p} - \sum_{q=1, q \neq p}^n Y_{pq} E_q \quad (4.6)$$

กำหนดให้

$$L_p = \frac{1}{Y_{pp}}$$

$$Y_{pq}L_p = YL_{pq}$$

$$P_p - jQ_p = K$$

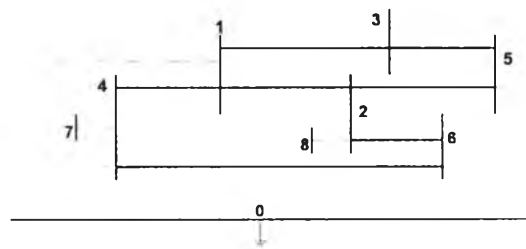
ดังนั้นสมการที่ 4.6 จะกลายเป็น

$$E_p = \frac{KL_p}{E_p} - \sum_{q=1, q \neq p}^n YL_{pq} E_q \quad (4.7)$$

ซึ่งในเทอมแรกทางขวาของสมการที่ 4.7 ที่คูณกับ L_p คือกระแสไหลคั่นเองตามสมการที่ 4.3 แต่เมื่อเราจำลองโหลดเป็นแอดมิตแตนซ์ดังนั้นกระแสที่ไหลจะเท่ากับศูนย์ สมการที่ 4.7 จะกลายเป็น

$$E_p = - \sum_{q=1, q \neq p}^n YL_{pq} E_q \quad (4.8)$$

ซึ่งเรียกสมการที่ 4.8 ว่า สมการแสดงระบบส่ง (Network Performance Equations) สมการที่ 4.8 นี้ เทอม YL_{pq} จะรวมค่า Y_{p0} เข้าไปด้วย ซึ่งต่างจากสมการที่ 4.6 ซึ่งไม่นำค่า Y_{p0} มาคิดเนื่องจากไม่ได้จำลองโหลดด้วยแอดมิตแตนซ์ พิจารณารูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงแบบจำลองของระบบส่ง



รูปที่ 4.3 แบบจำลองของระบบส่ง

กระจายสมการที่ 4.8

$$E_1 = -YL_{12}E_2 - YL_{13}E_3 - YL_{14}E_4 - YL_{10}E_0$$

โดยบัส 7 และบัส 8 คือบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเส้นประระหว่างบัส 0 คือแบบจำลองของโหนด

$$YL_{12} = Y_{12}L_1$$

$$YL_{13} = Y_{13}L_1$$

$$YL_{14} = Y_{14}L_1$$

$$L_1 = \frac{1}{Y_{11}}$$

$$Y_{11} = y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{10}$$

เนื่องจากศักดาไฟฟ้า E_0 เท่ากับศูนย์ดังนั้น

$$E_1 = -YL_{12}E_2 - YL_{13}E_3 - YL_{14}E_4$$

สมการศักดาไฟฟ้าที่บัส 2 คือ

$$E_2 = -YL_{21}E_1 - YL_{25}E_5 - YL_{26}E_6 - YL_{28}E_8$$

โดยบัส 8 เป็นบัสใหม่ที่เพิ่มเข้ามาดังนั้นสมาชิกของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในแนวทแยงมุมหลักของบัส 2 คือ

$$Y_{22} = y_{21} + y_{25} + y_{26} + y_{20} + y_{28}$$

โดย y_{20} คือแอดมิตแตนซ์ที่แทนแบบจำลองของโหนด และ y_{28} คือแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อกระจายสมการที่ 4.8 จะได้ว่า

$$E_1(k+1) = -YL_{12}E_2(k) - YL_{13}E_3(k) - YL_{14}E_4(k)$$

$$E_2(k+1) = -YL_{21}E_1(k+1) - YL_{25}E_5(k) - YL_{26}E_6(k) - YL_{28}E_8$$

$$E_3(k+1) = -YL_{31}E_1(k+1) - YL_{35}E_5(k)$$

$$E_4(k+1) = -YL_{41}E_1(k+1) - YL_{46}E_6(k) - YL_{47}E_7$$

$$E_5(k+1) = -YL_{52}E_2(k+1) - YL_{53}E_3(k+1)$$

$$E_6(k+1) = -YL_{62}E_2(k+1) - YL_{64}E_4(k+1)$$

จะเห็นว่าที่บัส 2 ค่าของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เปลี่ยนไปจากตอนคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยสมการเหล่านี้จะหาคำตอบออกมาได้โดยวนรอบไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ค่าความแตกต่างที่ยอมรับได้ โดยขนาดของศักดาไฟฟ้าที่บัส 8 และบัส 7 จะคงที่ตลอดการคำนวณเนื่องจากให้ Exciter Action ไม่เปลี่ยนแปลงแต่มุมจะเปลี่ยนแปลงซึ่งจะคำนวณหาจากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขซึ่งมีหลายวิธีแต่ในที่นี้จะใช้วิธี Modified Euler Method ส่วนศักดาไฟฟ้าในแต่ละบัสเริ่มต้นจะได้จากผลการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า

4.6 วิธีการของออยเลอร์ที่มีการปรับค่าความชัน (Modified Euler Method)

ในสภาวะปกติความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ω) จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสดังนั้นในสมการที่ 4.10 มุมของโรเตอร์ (δ) จะคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงนั่นเอง แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นมุมของโรเตอร์จะเปลี่ยนไปตามเวลานั้นคือ

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f}{H}(P_m - P_e) \quad (4.9)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi f = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (4.10)$$

พิจารณารูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยขนาดของ E คงที่ตลอดช่วงการวิเคราะห์เสถียรภาพตามสมมติฐานที่กล่าวไว้ เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบมุมและ

ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่ามุมและความเร็วที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยหาผลเฉลยของสมการที่ 4.11 และ 4.12

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i(t) - 2\pi f \quad (4.11)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei(t)}) \quad (4.12)$$

โดยที่ Governor Action ไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ P_m คงที่

$$P_{mi} = P_{mi(0)}$$

พิจารณารูปที่ 4.4 ในการประยุกต์วิธีของ Modified Euler Method เพื่อหาผลเฉลยของสมการที่ 4.11 และ 4.12 นั้นเราจะนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษา การไหลของกำลังไฟฟ้า เข้ามาที่บัสล๊อคที่ 1 ซึ่งหากเกิดการเปลี่ยนแปลง (Switching ,SW) ในระบบ (Y) จะไปที่บัสล๊อค 2 (Modified) เพื่อจำลองเหตุการณ์ เช่นเกิดฟอลต์ที่บัส 2 แบบจำลองคือศักดาไฟฟ้าที่บัส 2 เท่ากับศูนย์ เป็นต้นจากนั้นจะไปที่บัสล๊อค 3 เพื่อหาค่าศักดาไฟฟ้าในแต่ละบัสจากสมการที่ 4.8 (NPE , Network Performance Equation) และหา กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจาก

$$I_{i(t)} = (E_{i(t)} - E_{u(t)}) \frac{1}{r_{ai} + jx_{di}}$$

$$P_{ei(t)} = \text{Re}\{I_{i(t)} (E_{u(t)})^*\}$$

ต่อไปจะไปที่บัสล๊อค 4 Initial Estimates (First) เพื่อหาค่ามุม และความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดย Initial Estimate เราจะ Prediction หาค่า δ (Internal Voltage Angle) และ ω (Machine Speed) ที่เวลา $t + \Delta t$ โดย

$$\delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \delta_{i(t)}^{(1)} + \frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{t} \Delta t$$

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \frac{d\omega_i}{dt} \Big|_{(t)} \Delta t$$

จากนั้นจะไปบล็อกที่ 5 เพื่อหา $P_{ei(t+\Delta t)}^{(0)}$ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย (Air-Gap Power) ที่เวลา $t + \Delta t$ ของ Prediction โดยต้องหาค่าไฟฟ้าที่เวลา $t + \Delta t$ ของ Prediction ออกมาก่อนจากสมการที่ 4.8 โดยใช้ค่าไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น

$$e_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = |E_i| \cos \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)}$$

$$f_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = |E_i| \sin \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)}$$

จากนั้นจึงหาค่า $P_{ei(t+\Delta t)}^{(0)}$ จาก

$$I_{ii(t+\Delta t)}^{(0)} = (E_{ii(t+\Delta t)}^{(0)} - E_{ii(t+\Delta t)}^{(0)}) \frac{1}{r_{ai} + jx_{di}}$$

$$P_{ei(t+\Delta t)}^{(0)} = \text{Re}\{I_{ii(t+\Delta t)}^{(0)} (E_{ii(t+\Delta t)}^{(0)})^*\}$$

จากนั้นจะไปบล็อกที่ 6 คือ Final Estimates (Final) โดยจะทำการ Correction ค่าที่ได้ทำนายไว้ที่เวลา $t + \Delta t$ คือ

$$\delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \delta_{i(t)}^{(1)} + \left(\frac{\frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{(t)} + \frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t$$

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \left(\frac{\frac{d\omega_i}{dt} \Big|_{(t)} + \frac{d\omega_i}{dt} \Big|_{(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t \quad i = 1, 2, \dots, m$$

โดย

$$\frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{(t+\Delta t)} = \omega_{i(t+\Delta t)}^{(0)} - 2\pi f$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} \Big|_{t+\Delta t} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei(t+\Delta t)}^{(0)})$$

จากนั้นจะไปบล็อกที่ 7 เพื่อหา $P_{ei(t+\Delta t)}^{(1)}$ ซึ่งคือกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย (Air-Gap Power) ที่เวลา $t + \Delta t$ ของ Correction โดยต้องหาค่าไฟฟ้าที่เวลา $t + \Delta t$ ของ Correction ออกมาก่อนจากสมการที่ 4.8 โดยใช้ศักดาไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น

$$e_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = |E_i'| \cos \delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)}$$

$$f_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = |E_i'| \sin \delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)}$$

จากนั้นจึงหาค่า $P_{ei(t+\Delta t)}^{(1)}$ จาก

$$I_{ii(t+\Delta t)}^{(1)} = (E_{ii(t+\Delta t)}^{(1)} - E_{ui(t+\Delta t)}^{(1)}) \frac{1}{r_{ai} + jx_{di}}$$

$$P_{ei(t+\Delta t)}^{(1)} = \text{Re}\{I_{ii(t+\Delta t)}^{(1)} (E_{ii(t+\Delta t)}^{(1)})^*\}$$

จากนั้นจะไปบล็อกที่ 8 ซึ่งหาก $t + \Delta t$ มากกว่าหรือเท่ากับ T_{max} (Y) จะสิ้นสุดการคำนวณ หาก $t + \Delta t$ น้อยกว่า T_{max} (N) จะไปคำนวณต่อที่เวลา $t + 2\Delta t$ โดยนำค่า $\delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)}$ $\omega_{i(t+\Delta t)}^{(1)}$ $E_{p(t+\Delta t)}$ นี้ไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในรอบต่อไป โดยเมื่อถึงบล็อก 1 หากเหตุการณ์ยังไม่เปลี่ยนแปลง (N) จะไปที่บล็อกที่ 4 หากเหตุการณ์เปลี่ยนแปลง (Y) เช่น ฟลัดเคิลียร์ ให้ไปที่บล็อกที่ 2 เพื่อจำลองระบบต่อไป

กรณีมีผลกระทบเนื่องจาก Saliency Effects นั่นคือ Field Flux Linkages มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอีก 1 สมการคือ

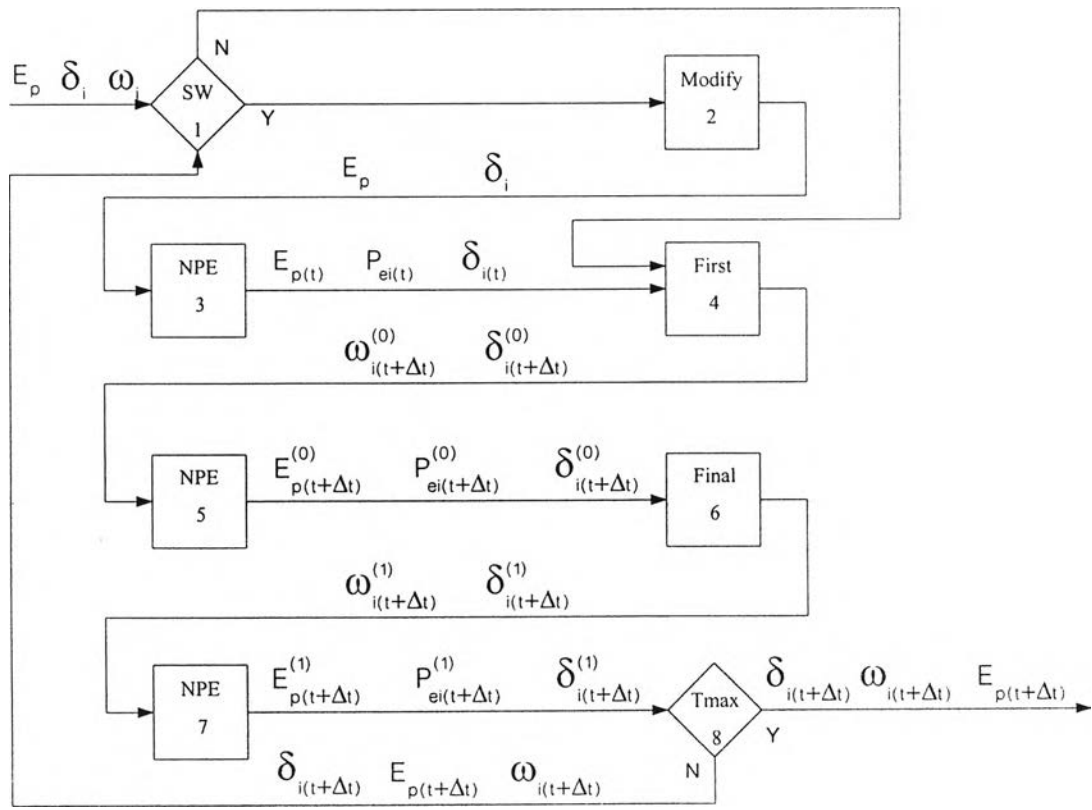
$$\frac{dE_{qi}'}{dt} = \frac{1}{T_{d0i}} (E_{fdi} - E_{qi}') \quad (4.13)$$

หากไม่คิดผลของ Exciter Action ดังนั้น E_{fd} (Field Voltage) คงที่

ดังนั้น

$$E_{fdi} = E_{fdi(0)}$$

ดังนั้นจะมีสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 1 ที่จะต้องหาผลเฉลยรวม 3 สมการคือสมการที่ 4.9 . สมการที่ 4.10 และสมการที่ 4.13 ซึ่งการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 3 สมการนี้จะคล้าย ๆ กันที่แสดง ไปแล้วเพียงแต่มีสมการเพิ่มขึ้นมาอีก 1 สมการ



รูปที่ 4.4 ผังการทำงานของวิธี Modified Euler Method

4.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพ [5]

ระบบที่จะทำการวิเคราะห์คือระบบ 5 บัสซึ่งมีข้อมูลที่ใช้ตามตารางที่ 4.1 ,4.2 ,4.3 และ 4.4 โดยผลการวิเคราะห์ การไหลของกำลังไฟฟ้า อยู่ในรูปที่ 4.5

บัส	$R+jX$ (pu)	$B/2$ (pu)
1-2	$0.02+j0.06$	$0.0+j0.030$
1-3	$0.08+j0.24$	$0.0+j0.025$
2-3	$0.06+j0.18$	$0.0+j0.020$
2-4	$0.06+j0.18$	$0.0+j0.020$
2-5	$0.04+j0.12$	$0.0+j0.015$
3-4	$0.01+j0.03$	$0.0+j0.010$
4-5	$0.08+j0.24$	$0.0+j0.025$

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของสายส่ง

บัส	ศักดาไฟฟ้า (pu)	กำลังผลิต (MW)	กำลังผลิต (Mvar)	โหลด (MW)	โหลด (Mvar)
1	$1.06+0.00$			0	0
2		40	30	20	10
3		0	0	45	15
4		0	0	40	5
5		0	0	60	10

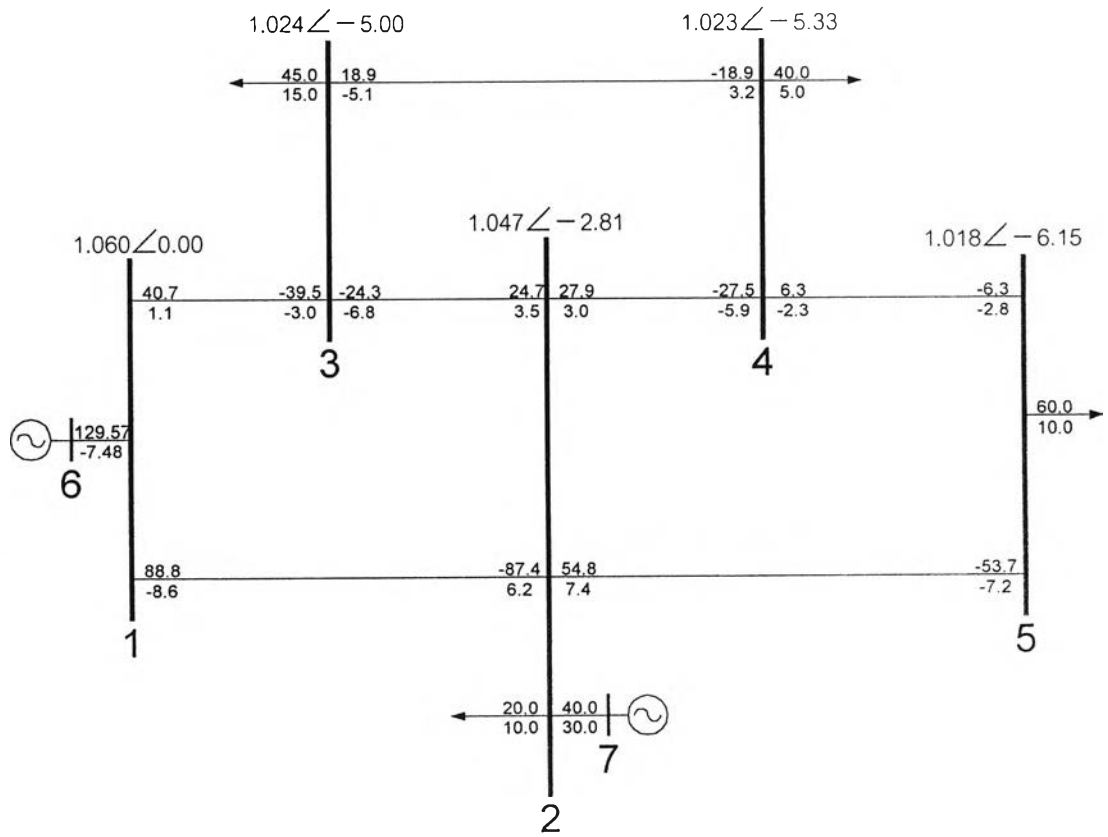
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของบัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส	H (MJ/MVA)	X_d' (pu)
1	50.0	$0.0+j0.25$
2	1.00	$0.0+j1.50$

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัส	1	2	3	4	5
1	6.25000 -j18.695	-5.00000 +j15.000	-1.25000 +j3.7500		
2	-5.00000 +j15.000	10.83334 -j32.415	-1.66667 +j5.000	-1.66667 +j5.000	-2.50000 +j7.500
3	-1.25000 +j3.7500	-1.66667 +j5.000	12.91667 -j38.695	-10.00000 +j30.000	
4		-1.66667 +j5.000	-10.00000 +j30.000	12.91667 -j38.695	-1.25000 +j3.750
5		-2.50000 +j7.500		-1.25000 +j3.750	3.750 -j11.210

ตารางที่ 4.4 แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์



รูปที่ 4.5 สภาพของระบบสภาวะปกติ

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพเราจะวิเคราะห์โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้แบบจำลอง Classical Model และโหลดใช้แบบจำลอง แอดมิตแตนซ์ to Ground โดยการใช้ บัส แอดมิตแตนซ์ เมตริกซ์ และวิธีการของเกาส์-ไซเดล ในการหาคำตอบของ Network Performance Equation และใช้วิธีของ Modified Euler Method สำหรับการหาคำตอบของสมการสวิง

ลำดับของเหตุการณ์มีดังนี้

ที่เวลา $t = 0.00$ วินาที เกิดสามเฟสฟอลต์ที่บัส 2

ที่เวลา $t = 0.10$ วินาที ฟอลต์เคลียร์

จากสมการที่ 4.8 กระจาย Network Performance Equation

$$E_1(k+1) = -YL_{12}E_2(k) - YL_{13}E_3(k) - YL_{16}E_6$$

$$E_2(k+1) = -YL_{21}E_1(k+1) - YL_{23}E_3(k) - YL_{24}E_4(k) - YL_{25}E_5(k) - YL_{27}E_7$$

$$E_3(k+1) = -YL_{31}E_1(k+1) - YL_{32}E_2(k) - YL_{34}E_4(k)$$

$$E_4(k+1) = -YL_{42}E_2(k+1) - YL_{43}E_3(k+1) - YL_{45}E_5(k)$$

$$E_5(k+1) = -YL_{52}E_2(k+1) - YL_{54}E_4(k+1)$$

Y_{BUS} ในตารางที่ 4.4 ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเราจะทำการปรับปรุงโดยรวมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดเข้าไปด้วยดังรูปที่ 4.5

$$YL_{pq} = Y_{pq}L_p = Y_{pq} \left(\frac{1}{Y_{pp}} \right)$$

ปรับปรุง Element 1 – 2 เป็น

$$YL_{12} = Y_{12} \left(\frac{1}{Y_{11} + y_{16}} \right)$$

$$= \left(\frac{-5.000 + j15.000}{6.25 - j22.695} \right)$$

$$= -0.67074 - j0.03560$$

โดยที่ Y_{11} และ Y_{12} คือสมาชิกในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ส่วน y_{16} คือ แอดมิตแตนซ์สมมูลของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1

$$Y_{L_{13}} = Y_{13} \left(\frac{1}{Y_{11} + y_{16}} \right)$$

$$Y_{L_{16}} = Y_{16} \left(\frac{1}{Y_{11} + y_{16}} \right)$$

โดย

$$Y_{L_{16}} = -y_{16}$$

ปรับปรุง Element 2 – 1 เป็น

$$Y_{L_{21}} = Y_{21} \left(\frac{1}{Y_{22} + y_{27} + y_{20}} \right)$$

โดย Y_{22} และ Y_{21} คือสมาชิกในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ส่วน y_{27} แอดมิตแตนซ์สมมูลของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และ y_{20} คือ แอดมิตแตนซ์ของโหลดที่บัส 2 ดังนั้น

$$Y_{L_{21}} = Y_{21} \left(\frac{1}{Y_{22} + y_{27} + y_{20}} \right)$$

$$y_{20} = \left(\frac{0.2 - j0.1}{(1.04621)^2 + (0.05128)^2} \right)$$

$$= 0.18228 - j0.09114$$

ดังนั้น

$$Y_{L_{21}} = \frac{-5.000 + j15.000}{11.01562 - j33.17281}$$

$$= -0.45235 - j0.00052$$

โดยวิธีการดังกล่าวมานี้จะได้ $Y_{L_{pq}}$ ของทุก Element ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5

บัส p- บัส q	$Y_{L_{pq}}$
1-2	-0.67074-j0.03560
1-3	-0.16769-j0.00890
1-6	-0.16383+j0.04512
2-1	-0.45235-j0.00052
2-3	-0.15078-j0.00017
2-4	-0.15078-j0.00017
2-5	-0.22618-j0.00026
2-7	-0.01810+j0.00601
3-1	-0.09625+j0.00089
3-2	-0.12833+j0.00119
3-4	-0.77000+j0.00711
4-2	-0.12866+j0.00115
4-3	-0.77198+j0.00687
4-5	-0.09650+j0.00086
5-2	-0.65236+j0.02866
5-4	-0.32618+j0.01433

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลของสายส่งที่ใช้ในการคำนวณ

ศักดาไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า E คำนวณจาก

$$E_i = E_{ti} + jx_{di} I_{ti}$$

$$I_{ti} = \frac{P_{ti} - jQ_{ti}}{E_{ti}}$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1

$$\begin{aligned} E_6 &= 1.06 + j0.0 + j0.25 \left(\frac{1.29565 + j0.07480}{1.06 - j0.0} \right) \\ &= 1.04236 + j0.30558 \end{aligned}$$

$$|E_6| = 1.08623$$

$$\delta_6 = 16.339^\circ \text{ หรือ } 0.28517 \text{ rad}$$

ในวิธีเดียวกันนี้จะได้

$$E_7 = 1.50335 + j0.49981$$

$$|E_7| = 1.58426$$

$$\delta_7 = 18.39^\circ \text{ หรือ } 0.32097 \text{ rad}$$

เมื่อเกิดสามเฟสฟอลต์ที่บัส 2 เราจะให้ศักดาไฟฟ้าที่บัส 2 เท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อเราแก้สมการที่ 4.8 จะได้ผลตามตารางที่ 4.6

บัส	ศักดาไฟฟ้า
1	0.19234+0.00330
2	0.00000+j0.00000
3	0.04707-j0.00096
4	0.03758-j0.00118
5	0.01226-j0.00093

ตารางที่ 4.6 ศักดาไฟฟ้าในแต่ละบัสขณะเกิดฟอลต์

ขณะเกิดสามเฟสฟอลต์กระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 หาจาก

$$I_{ti} = (E_i' - E_{ti})y_{pi}$$

ดังนั้น

$$I_{61} = \{(1.04236 + j0.30558) - (0.19234 + j0.00330)\}(0.0 - j4.0)$$

$$= 1.20912 - j3.40008$$

$$I_{72} = \{(1.50335 + j0.49981) - (0.0 + j0.0)\}(0.0 - j6.6667)$$

$$= 0.33321 - j1.00223$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคำนวณจาก

$$P_{ei} - jQ_{ei} = I_{ti}(E_i')$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1

$$P_{e6} = (1.20912)(1.04236) - (3.40008)(0.30558)$$

$$= 0.22134$$

เนื่องจากเกิด ฟอลต์ ที่บัส 2 ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 เท่ากับศูนย์โดยตรวจ

สอบจาก

$$P_{e7} = (0.33321)(1.50335) - (1.00223)(0.49981)$$

$$= 0.0000067$$

ในการหา Initial Estimates ของ δ และ ω ที่เวลา $t + \Delta t$ นั้นเริ่มจาก

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei(t)})$$

ที่เวลา $t = 0$ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_6}{dt} \Big|_{(0)} &= \frac{3.1416(60)}{50.0} (1.29565 - 0.22134) \\ &= 4.05006 \end{aligned}$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 คือ

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_7}{dt} \Big|_{(0)} &= \frac{3.1416(60)}{1.0} (0.400 - 0.00) \\ &= 75.3984 \end{aligned}$$

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \frac{d\omega_i}{dt} \Big|_{(t)} \Delta t$$

ที่เวลา $t = 0$

$$\omega_{i(t)}^{(1)} = 2\pi f$$

$$\begin{aligned} \omega_{6(0.02)}^{(0)} &= 2(3.1416)(60) + (4.05006)0.02 \\ &= 376.992 + 0.0810 \\ &= 377.0730 \end{aligned}$$

และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 คือ

$$\omega_{7(0.02)}^{(0)} = 2(3.1416)(60) + (75.3984)0.02$$

$$= 376.992 + 1.50797$$

$$= 378.49997$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์คำนวณจาก

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i(t) - 2\pi f$$

โดยที่เวลา $t = 0$

$$\left. \frac{d\delta_6}{dt} \right|_{t(0)} = 0.0$$

$$\left. \frac{d\delta_7}{dt} \right|_{t(0)} = 0.0$$

ในการหา Initial Estimates ของ δ ที่เวลา $t + \Delta t$ นั้นเริ่มจาก

$$\delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \delta_{i(t)}^{(1)} + \left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{t(t)} \Delta t$$

โดยที่

$$\delta_{6(0.02)}^{(0)} = 0.28517$$

$$\delta_{7(0.02)}^{(0)} = 0.32097$$

ดังนั้นศักดาไฟฟ้าและมุมที่จะนำไปใช้ในสมการที่ 4.8 คือ

$$e_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = |E_i| \cos \delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)}$$

$$f_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = |E_i| \sin \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)}$$

ซึ่งมีค่าเท่าเดิมเนื่องจากมุมโรเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีที่เวลาใด ๆ และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามักมีค่าเท่าเดิมดังนั้นที่เวลา $t + \Delta t = 0.02$ ได้ว่า

$$\frac{d\omega_6}{dt} \Big|_{t(0.02)} = 4.05006$$

$$\frac{d\omega_7}{dt} \Big|_{t(0.02)} = 75.39484$$

Final Estimate สำหรับ ω ที่เวลา $t + \Delta t$ คำนวณจาก

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \left(\frac{\frac{d\omega_i}{dt} \Big|_{t(t)} + \frac{d\omega_i}{dt} \Big|_{t(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t \quad i = 1, 2, \dots, m$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1

$$\begin{aligned} \omega_{6(0.02)}^{(1)} &= 2(3.1416)60 + \left(\frac{4.05006 + 4.05006}{2} \right) 0.02 \\ &= 377.0730 \end{aligned}$$

และที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 คือ

$$\begin{aligned} \omega_{7(0.02)}^{(1)} &= 2(3.1416)60 + \left(\frac{75.3984 + 75.3984}{2} \right) 0.02 \\ &= 378.49997 \end{aligned}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ (δ) ที่เวลา $t + \Delta t$ คำนวณจาก

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_{(t+\Delta t)}^{(1)} - 2\pi f$$

โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 คือ

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_6}{dt} \Big|_{(0.02)} &= 377.0730 - 376.9920 \\ &= 0.0810 \end{aligned}$$

และที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 คือ

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_7}{dt} \Big|_{(0.02)} &= 378.49997 - 376.9920 \\ &= 1.50797 \end{aligned}$$

ดังนั้น Final Estimate สำหรับ δ ที่เวลา $t + \Delta t$ คำนวณจาก

$$\delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \delta_{i(t)}^{(1)} + \left(\frac{\frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{(t)} + \frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t$$

โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 คือ

$$\begin{aligned} \delta_{6(0.02)}^{(1)} &= 0.28517 + \left(\frac{0.0 + 0.0810}{2} \right) 0.2 \\ &= 0.28517 + 0.00081 \\ &= 0.28598 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_{7(0.02)}^{(1)} &= 0.32097 + \left(\frac{0.0 + 1.50797}{2} \right) 0.2 \\ &= 0.32097 + 0.01508 \\ &= 0.33605\end{aligned}$$

ดังนั้นมุมโรเตอร์ที่เวลา $t + \Delta t = 0.02$ คือ

$$\begin{aligned}\delta_{6(0.02)}^{(1)} &= 0.28598 \left(\frac{180}{\pi} \right) = 16.38540^\circ \\ \delta_{7(0.02)}^{(1)} &= 0.33605 \left(\frac{180}{\pi} \right) = 19.25420^\circ\end{aligned}$$

ดังนั้นศักดาไฟฟ้าที่เวลา $t + \Delta t = 0.02$ ที่บัส 6 และบัส 7 คือ

$$\begin{aligned}e_6^{(1)} &= 1.08623 \cos(16.38540) \\ &= 1.04212\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_7^{(1)} &= 1.08623 \cos(16.38540) \\ &= 0.30641\end{aligned}$$

หรือ

$$E_6^{(1)} = 1.04212 + j0.3064$$

$$\begin{aligned}e_7^{(1)} &= 1.58426 \cos(19.25420) \\ &= 1.49564\end{aligned}$$

$$f_7^{(1)} = 1.58426 \sin(19.25420)$$

$$= 0.52243$$

หรือ $E_7^{(1)} = 1.49564 + j0.52243$

จากนั้นทำการหาศักดาไฟฟ้าในทุก ๆ บัสจากสมการที่ 4.8 และได้ผลตามตารางที่ 4.7

บัส	ศักดาไฟฟ้า
1	0.19258+j0.00353
2	0.00000+j0.00000
3	0.04815-j0.00114
4	0.03845-j0.00133
5	0.01249-j0.00097

ตารางที่ 4.7 ศักดาไฟฟ้าในแต่ละบัสที่เวลา 0.02 วินาที

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 ที่เวลา $t + \Delta t = 0.02$ คำนวณจาก

$$I_{61(0.02)} = \{(1.04212 + j0.30641) - (0.19258 + j0.00350)\}(0.0 - j4.0)$$

$$= 1.21152 - j3.39816$$

$$P_{e6(0.02)} = (1.21152)(1.04212) - (3.39816)(0.30641)$$

$$= 0.22132$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 ที่เวลา $t = 0.02$ คำนวณจาก

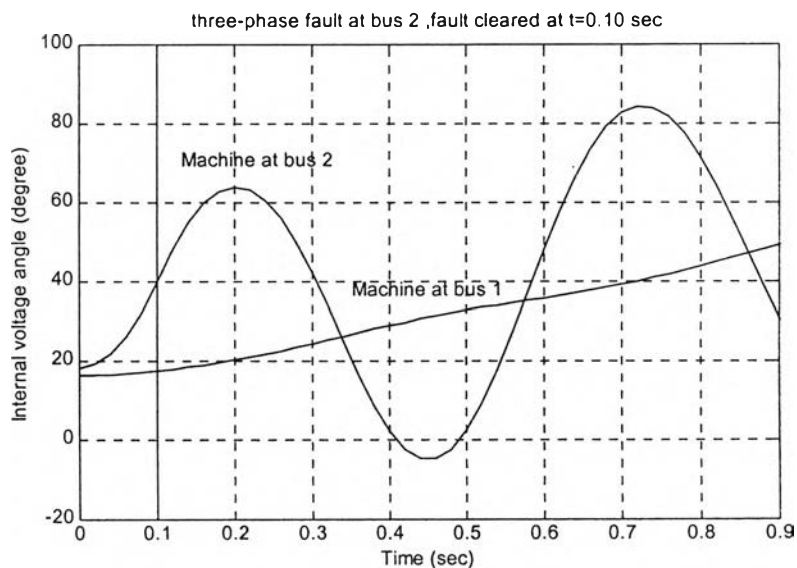
$$I_{72(0.02)} = \{(1.49564 + j0.52243) - (0.0 + j0.0)\}(0.0 - j6.66667)$$

$$= 0.34829 - j0.99710$$

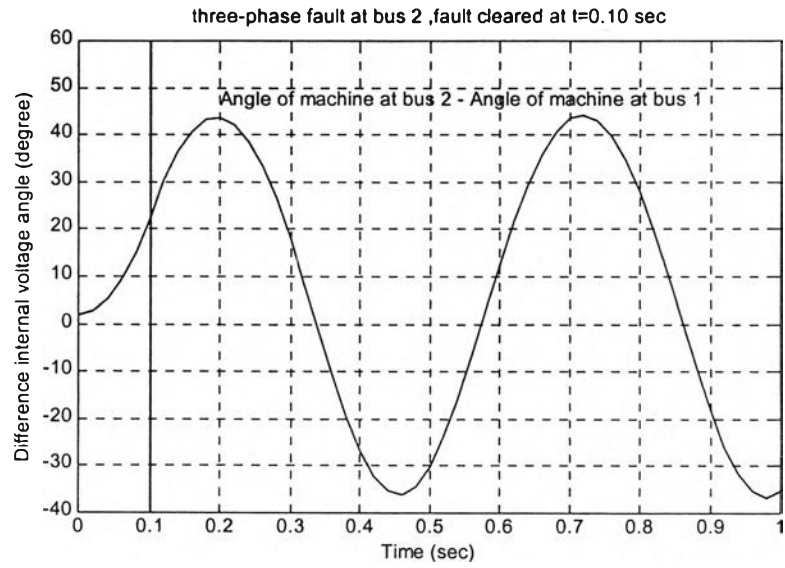
$$P_{e7(0.02)} = 0 \quad \text{เนื่องจากเกิดฟอลต์ที่บัส 2}$$

มาถึงขั้นนี้เราได้ค่าของ δ และ ω ที่เวลา $t = 0.02$ วินาทีโดยสมบูรณ์แล้ว เมื่อเรากำหนดให้ $\Delta t = 0.02$ เมื่อทำการคำนวณจนถึงที่ $t = 0.10$ วินาที เป็นอันสิ้นสุดช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ อย่างไรก็ตามที่ $t > 0.10$ ฟอลต์หายไปดังนั้นเมื่อคำนวณสมการที่ 4.8 จะปราศจากฟอลต์และศักดาไฟฟ้าที่บัส 2 จะไม่เท่ากับศูนย์ โดยรอบสุดท้ายที่คำนวณค่า Final Estimate คือที่เวลาเท่ากับ 0.10 จะนำไปใช้ในการคำนวณในเหตุการณ์หลังจากฟอลต์หายไป

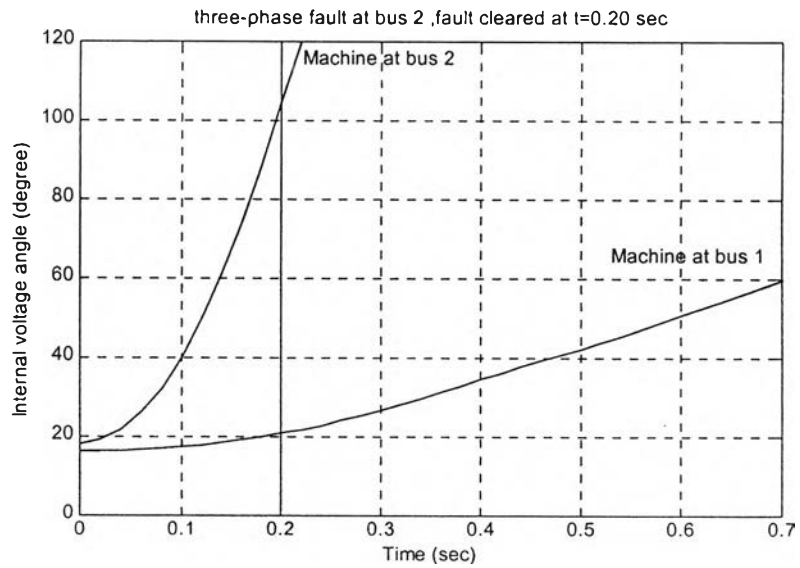
ค่า δ และ $\frac{\omega}{2\pi f}$ กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.1 วินาที และค่า δ และ $\frac{\omega}{2\pi f}$ กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.2 วินาที อยู่ในรูปที่ 4.6 ถึง 4.11 และได้ข้อสรุปคือกรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.1 วินาที ระบบมีเสถียรภาพ แต่กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.2 วินาที ระบบสูญเสียเสถียรภาพ



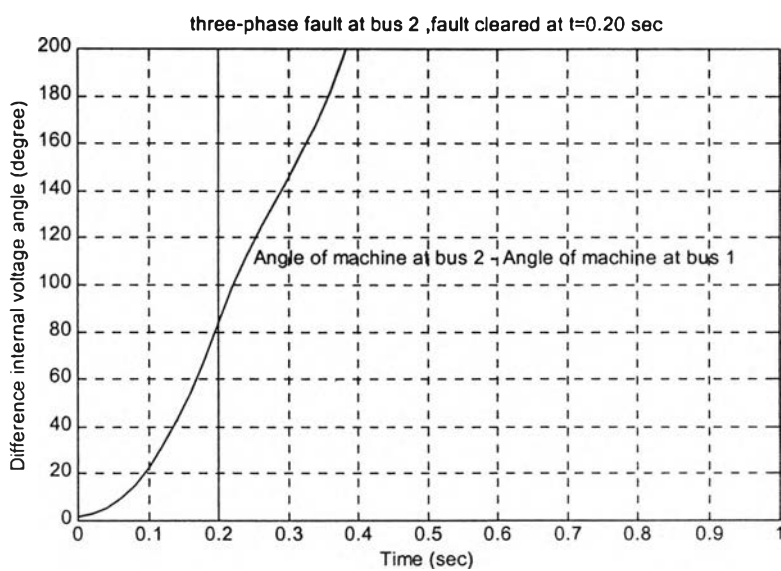
รูปที่ 4.6 มุม โรเตอร์กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.10 วินาที



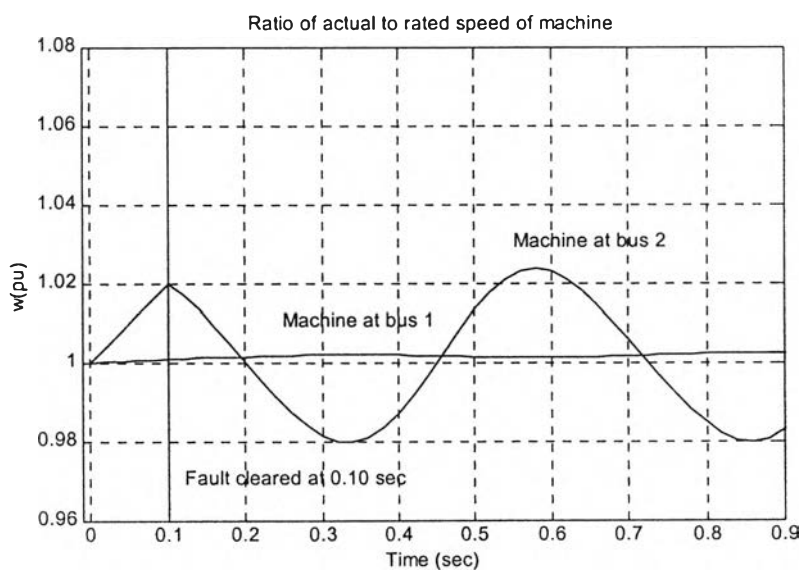
รูปที่ 4.7 ผลต่างของมุมโรเตอร์กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.10 วินาที



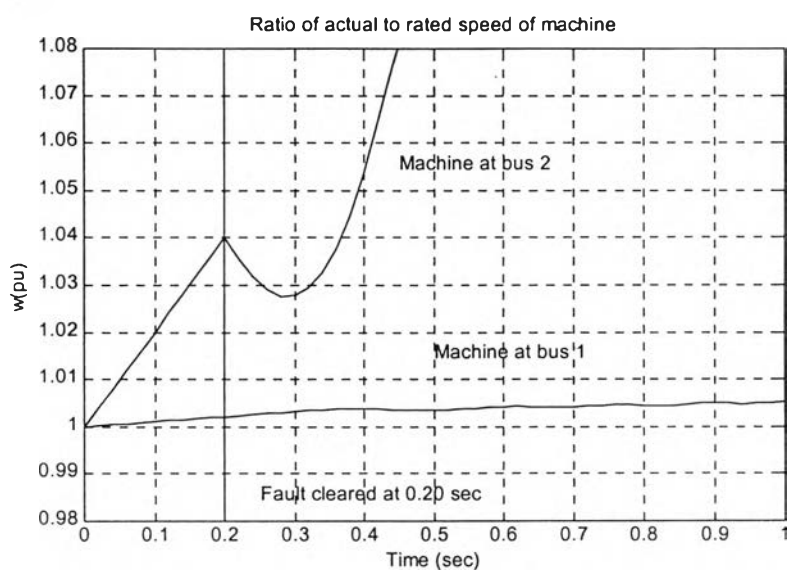
รูปที่ 4.8 มุมโรเตอร์กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.20 วินาที



รูปที่ 4.9 ผลต่างของมุม โรเตอร์กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.20 วินาที



รูปที่ 4.10 ความเร็วของโรเตอร์กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.10 วินาที



รูปที่ 4.11 ความเร็วของโรเตอร์กรณีฟอลต์เคลียร์ที่ 0.20 วินาที