

บทที่ 5

หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

การศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพชั่วคราว เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลัง ในการทำงานไปพร้อมๆ กันหรือที่เรียกว่า มีการซิงโครไนซ์ (Synchronism) กัน ระหว่างที่เกิดการรบกวนระบบขึ้น (System Disturbance) อันเป็นผลมาจากความสูญเสียกำลังผลิตหรือระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไป รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของภาระทางไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด และความผิดพลาดชั่วครู่ (Momentary Fault) การศึกษานี้จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า ความเร็ว และทอร์คของเครื่องจักรของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันระบบ และการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) ในทันทีหลังจากเกิดการรบกวนระบบ ระดับของเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการวางแผนระบบใหม่ เนื่องจากความน่าเชื่อถือของระบบนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นที่ระบบไฟฟ้ากำลังต้องได้รับการออกแบบให้มีเสถียรภาพ ภายใต้การรบกวนระบบแบบต่างๆ นั้นเอง

คุณสมบัติของระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient) สามารถพิจารณาได้จากสมการคุณสมบัติของวงจรเครือข่าย (Network Performance Equation) ในการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow) ถือเป็นขั้นตอนแรกในการกำหนดสภาวะเริ่มต้นของระบบก่อนเกิดการรบกวน ในการคำนวณระบบจะประกอบไปด้วยแบบจำลองต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแบบจำลองของระบบผลิตพลังงานรวมที่เราสนใจศึกษาถึงเสถียรภาพในขณะที่เกิดการแยกออกจากระบบไฟฟ้า (Islanding) เพื่อทดสอบดูว่าระบบผลิตพลังงานรวมที่ได้ทำการออกแบบ หรือมีการทำงานในลักษณะต่างๆ กัน ยังคงสามารถที่จะทำงานต่อไปได้อย่างมีเสถียรภาพหรือไม่ เมื่อเกิดการรบกวนระบบดังกล่าวขึ้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) เป็นการรวมผลเฉลยของสมการพีชคณิต (Algebraic Equation) ที่อธิบายเกี่ยวกับวงจรเครือข่าย (Network) กับผลเฉลยทางจำนวน (Numerical Solution) ของสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) เข้าด้วยกัน ผลเฉลยของสมการวงจรเครือข่ายจะให้สมบัติเฉพาะของระบบซึ่งนำไปสู่การหาแรงดัน และกระแสของ

ระบบในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient Period) ในที่นี่จะใช้วิธีโมดิฟายด์ออยเลอร์ (Modified Euler Method) เพื่อหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์สำหรับการศึกษาเสถียรภาพของระบบผลิตพลังงานร่วมต่อไป

5.1 สมการการแกว่ง (Swing Equation) [9,13-16,18]

ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การเปลี่ยนแปลงเชิงมุมของโรเตอร์ (Rotor) และความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้า จะเป็นตัวแปรสำคัญในการที่จะตัดสินว่า ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาอยู่นั้นยังคงมีเสถียรภาพอยู่หรือไม่หลังจากเกิดการรบกวนระบบ (Disturbance) ขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์ ที่เป็นการอธิบายถึงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ (Rotor) ของเครื่องจักรไฟฟ้าให้ได้ จากทอร์กที่กระทำบนโรเตอร์ (Rotor) ของเครื่องจักรไฟฟ้า ประกอบด้วยทอร์กทางกลที่ได้จากตัวขับ (Prime Mover) ทอร์กจากความสูญเสียในการหมุน (Rotational Losses) ทอร์กทางไฟฟ้า (Electrical Output Torque) และทอร์กการหน่วง (Damping Torque) เนื่องจากตัวขับ (Prime Mover) เครื่องจักรไฟฟ้า และระบบไฟฟ้ากำลังเอง แต่สำหรับการคิดในที่นี้จะไม่นับถึงผลของการหน่วง (Damping) และความสูญเสียจากการหมุน (Rotational Losses) จะได้สมการการแกว่งดังนี้

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega = \omega(t) - 2\pi f \quad (5.1)$$

สมการที่ (5.1) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ในรูปการเปลี่ยนแปลงมุมของโรเตอร์ (Rotor Angle)

เมื่อ δ = มุมของโรเตอร์ (Rotor Angle)

ω = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (Rotor Angular Speed)

ω_s = ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

และ

$$\frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{\pi f}{H} (T_m - T_e) \quad (5.2)$$

สมการที่ (5.2) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ (Rotor Speed) กับทอร์คสุทธิ (Net Torque) ที่กระทำบนโรเตอร์ (Rotor)

เมื่อ T_m = ทอร์คทางกล (Mechanical Torque)
 T_e = ทอร์คทางไฟฟ้า (Electrical Air Gap Torque)
 H = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องจักร

เนื่องจากค่าของทอร์ค และกำลังในรูปของค่าต่อหน่วย (Per-unit) มีค่าเท่ากัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงของความเร็วค่าน้อยๆ ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (5.2) ได้ใหม่เป็น

$$\frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (5.3)$$

เมื่อ P_m = กำลังทางกล (Mechanical Power)
 P_e = กำลังทางไฟฟ้า (Electrical Air Gap Power)

จากสมการที่ (5.1) และ (5.3) เป็นสมการอนุพันธ์ที่แสดงถึงการตอบสนองของมุม และความเร็วของโรเตอร์ (Rotor) ของเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งจะได้มีการพิจารณาเป็นขั้นของช่วงเวลา ตามวิธีการหาค่าเฉลยทางจำนวน (Numerical Solution) ต่อไป

5.2 สมการระบบไฟฟ้า (Power System Equation) [13]

สมการระบบไฟฟ้าเป็นสมการที่ใช้แสดงลักษณะเฉพาะหรือพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าที่ทำการพิจารณา ได้แก่ การแทนภาระทางไฟฟ้าลงในระบบ (Representation of Load) และสมการแสดงพฤติกรรมของวงจรเครือข่าย (Network Performance Equation) ที่เป็นการคำนวณสมการพีชคณิต มีความสำคัญในการหาค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าต่อไป

5.2.1 การแสดงภาระทางไฟฟ้าในการคำนวณ (Representation of Load)

ภาระทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้หลายลักษณะในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient Period) โดยทั่วไปการแทนภาระทางไฟฟ้าอาจจะใช้เป็นค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) หรือค่าแอดมิตแตนซ์ (Admittance) คงที่ ที่มีต่อลงกราวด์ (Ground) หรือใช้แทนด้วยค่ากระแสคงที่ที่ค่าองค์ประกอบกำลัง (Power Factor) ค่าหนึ่ง หรือจะใช้เป็นค่ากำลังจริง (Real Power) และค่ากำลังรีแอคทีฟ (Reactive Power) คงที่ หรือเป็นการรวมแบบต่างๆ เข้าด้วยกันก็ได้ ตามความเหมาะสม

ภาระทางไฟฟ้าที่มีกำลังคงที่ จะมีค่าเท่ากับค่าภาระจริง (Real Load) และภาระรีแอคทีฟ (Reactive Load) ที่บัสนั้นๆ ตามตาราง หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉพาะของภาระทางไฟฟ้าในกรณีที่มีการรวมกันหลายๆ แบบก็ได้ โดยหลักๆ สามารถคำนวณได้จากค่าของกระแส และแรงดันที่บัสต่างๆ จากการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow) ก่อนที่ระบบจะเกิดการรบกวนขึ้น ค่าเริ่มต้นของกระแสหาได้จาก

$$I_{po} = \frac{P_{Lp} - jQ_{Lp}}{E_p^*} \quad (5.4)$$

เมื่อ P_{Lp} และ Q_{Lp} เป็นค่าภาระที่บัสตามตาราง และ E_p เป็นค่าแรงดันบัสที่ได้จากการคำนวณ กระแส I_{po} จะไหลจากบัส p ลงสู่กราวด์ (Ground) โดยขนาดและค่ามุมองค์ประกอบกำลัง (Power Factor Angle) ของ I_{po} ยังคงมีค่าคงที่ ค่าแอดมิตแตนซ์ y_{po} จะใช้แทนภาระที่บัส p ซึ่งหาได้จาก

$$(E_p - E_o) y_{po} = I_{po} \quad (5.5)$$

เมื่อ E_p เป็นค่าแรงดันบัสจากการคำนวณ และ E_o เป็นแรงดันที่กราวด์ (Ground Voltage) ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$y_{po} = \frac{I_{po}}{E_p} \quad (5.6)$$

คุณลักษณะและส่วนของสมการที่ (5.6) ด้วย E_p^* และแยกองค์ประกอบส่วนจริงและส่วนจินตภาพออกมา จะได้

$$g_{po} = \frac{P_{Lp}}{e_p^2 + f_p^2}; \quad b_{po} = \frac{Q_{Lp}}{e_p^2 + f_p^2}$$

เมื่อ $y_{po} = g_{po} - jb_{po}$ (5.7)

จากที่ได้แสดงออกมาเป็นการแทนภาระทางไฟฟ้าด้วยค่าแอดมิตแตนซ์คงที่ ต่อลงกราวด์ (Ground) ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณสมการแสดงพฤติกรรมของวงจรเครือข่าย (Network Performance Equation) ต่อไป

5.2.2 สมการแสดงพฤติกรรมของวงจรเครือข่าย (Network Performance Equation)

การหาผลเฉลยของสมการแสดงพฤติกรรมของวงจรเครือข่าย ก็คือการหาคำตอบในส่วน
ของสมการพีชคณิตซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับกระแส และแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า โดยใช้การหา
คำตอบของสมการแบบคำนวณซ้ำ (Iterative Calculation) เพื่อทำการหาค่าของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
ต่างๆ ในขณะใดขณะหนึ่ง จากนั้นจึงนำค่าแรงดันที่ได้ไปใช้คำนวณค่ากระแสของเครื่องจักรไฟฟ้า
ในระบบ เพื่อจะได้หาค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าในขณะใดขณะหนึ่ง และนำกำลังไฟฟ้าของ
เครื่องจักรไฟฟ้านี้ไปใช้ในสมการอนุพันธ์ เพื่อคำนวณหาค่ามุมทางไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าต่อไป

รูปแบบของสมการมาจากการกำหนดแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้า และภาระทางไฟฟ้า
เนื่องจากภาระทางไฟฟ้ากำหนดเป็นลักษณะของกำลังคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันบัส
ที่ภาระทางไฟฟ้านั้นต่ออยู่ ดังได้กล่าวไปแล้วในส่วนของแบบจำลองภาระทางไฟฟ้า จึงทำการ
เปลี่ยนค่ากำลังภาระทางไฟฟ้าที่ได้แทนด้วยค่าแอดมิตแตนซ์ต่อลงกราวด์ (Ground) สำหรับเครื่อง
จักรไฟฟ้าจะนำค่าทรานเซียนตรีแอคแตนซ์ (Transient Reactance) ตามแบบจำลองของเครื่อง
จักรไฟฟ้ามาใช้ โดยทั้งค่าแอดมิตแตนซ์ของภาระทางไฟฟ้าและค่าทรานเซียนตรีแอคแตนซ์ของ
เครื่องจักรไฟฟ้า จะมีการนำไปใช้เพิ่มเติมในส่วนของเมตริกวงจรกิจเครือข่าย (Network Matrix or
Bus Admittance Matrix; Ybus) ต่อไป

เมื่อได้เมตริกของวงจรเครือข่ายใหม่ออกมาแล้ว ก็จะนำไปคำนวณเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ โดยการคำนวณซ้ำแบบ Gauss-Seidel Iteration ตามสมการต่อไปนี้

$$E_p^{k+1} = -\sum_{q=1}^{p-1} YL_{pq} E_q^{k+1} - \sum_{q=p+1}^n YL_{pq} E_q^k - \sum_{l=1}^m YL_{pl} E_l^i \quad (5.8)$$

เมื่อ $p = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนบัส)

E_i^i = ค่าแรงดันของเครื่องจักรไฟฟ้าแต่ละตัว

$$YL_{pq} = Y_{pq}/Y_{pp}$$

Y_{pq}, Y_{pp} เป็นสมาชิกของ Y_{bus} ที่ได้รับการเพิ่มเติมจากค่าทรานเซียนตริแอกแทนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้า และค่าแอดมิตแตนซ์ของภาระทางไฟฟ้าเข้าไปแล้ว

การคำนวณของแต่ละบัส จะถูกทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสจะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ จึงจะนำค่าแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสไปใช้ต่อไป

5.3 วิธีการหาผลเฉลย (Solution Techniques) [13]

5.3.1 การคำนวณเบื้องต้น (Preliminary Calculations)

ขั้นตอนแรกในการศึกษาด้านเสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) คือการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow Calculation) เพื่อให้ได้สถานะของระบบก่อนเกิดการรบกวน (Disturbance) ขึ้น จากนั้นข้อมูลของวงจรเครือข่าย (Network Data) จะได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป นอกจากนี้ กระแสของเครื่องจักรไฟฟ้าก่อนการรบกวนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.9)

$$I_{ii} = \frac{P_{ii} - jQ_{ii}}{E_{ii}^*}; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.9)$$

เมื่อ m เป็นจำนวนเครื่องจักร ส่วน P_{ii} และ Q_{ii} เป็นค่ากำลังจริง (Real Power) และค่ากำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าจากตาราง หรือจากการคำนวณ

โดยค่ากำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าที่บัลลัสอ้างอิง (Slack Bus) รวมทั้งค่าแรงดันที่ขั้วได้มา แล้วจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow Calculation) ตั้งแต่ต้น ขั้นตอนสุดท้ายก็คือ ต้องมีการคำนวณแรงดันหลังค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าทุกตัวออกมาด้วย

เมื่อเครื่องจักรไฟฟ้า i ถูกแทนด้วยค่าแหล่งจ่ายแรงดันคงที่หลังค่าพารามิเตอร์เขียนตรีแอกแดนซ์ จะสามารถคำนวณค่าแรงดันได้จากสมการที่ (5.10)

$$E'_{i(0)} = E_{ii} + r_{ai} I_{ii} + jX'_{di} I_{ii} \quad (5.10)$$

โดย $E'_{i(0)}$ จะเป็นค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ และมีความมุมแรงดันเริ่มต้นเป็น $\delta_{i(0)}$ ส่วนค่าของความถี่เริ่มต้น $\omega_{i(0)}$ ในหน่วยของเรเดียนต่อวินาที จะมีค่าเท่ากับ $2\pi f$ เมื่อ f เป็น ความถี่ในหน่วยของรอบต่อวินาที ค่าเริ่มต้นของกำลังป้อนเข้าทางกล $P_{mi(0)}$ จะมีค่าเท่ากับกำลัง ทางไฟฟ้า P_{ei} ก่อนเกิดการรบกวนขึ้น ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5.11)

$$P_{ei} = P_{ii} + |I_{ii}|^2 r_{ai} \quad (5.11)$$

โดย $|I_{ii}|^2 r_{ai}$ เป็นค่าความสูญเสียในส่วนของสเตเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้า (Stator Losses)

เมื่อแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้ามีการคิดผลของลักษณะขั้วยื่นเด่น (Saliency) และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (Changes in Field Flux Linkages) ค่าสำหรับใช้แทนเครื่อง จักกรไฟฟ้าจะใช้เป็นค่าของแรงดันหลังค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแกนตั้งฉาก (Voltage Back of Quadrature Axis Synchronous Reactance) แทน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.12)

$$E_{qi} = E_{ii} + r_{ai} I_{ii} + jX_{qi} I_{ii} \quad (5.12)$$

โดยจะมีมุมของแรงดันเริ่มต้นเป็น $\delta_{i(0)}$ เหมือนกับในกรณีที่เป็นแบบจำลองอย่างง่าย (Classical Model) ค่าความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ $2\pi f$ รวมทั้งค่ากำลังทางกลเริ่มต้นก็มีค่าเท่ากับ กำลังทางไฟฟ้า P_{ei} ด้วยเช่นกัน

การคำนวณค่าแรงดันที่เป็นสัดส่วนกับกระแสสนาม E_{ii} และค่าแรงดันที่เป็นสัดส่วนกับเส้นแรงแม่เหล็ก $E'_{qi(0)}$ สามารถหาได้จากสมการที่ (5.13) และ (5.14) ตามลำดับ

$$E_{ii} = E_{ii} + r_{ai} I_{ii} + jX_{di} I_{di} + jX_{qi} I_{qi} \quad (5.13)$$

และ

$$E'_{qi} = E_{qi} - (X_{qi} - X'_{di}) I_{di} \quad (5.14)$$

เมื่อ $E'_{qi(0)}$ เป็นค่าเริ่มต้นที่ใช้สำหรับแก้สมการอนุพันธ์ ค่าของแรงดันสนามเริ่มต้น $E_{FD(0)}$ จะมีค่าเท่ากับ E_{ii} เมื่อตัดผลของการอิมิต์วออกไป

ขั้นต่อไปเป็นการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อที่จำลองการเกิดการรบกวนระบบขึ้น ได้แก่ การสูญเสียกำลังผลิต ภาระทางไฟฟ้า หรือระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังไป สามารถก่อให้เกิดผลกระทบได้โดยการตัดส่วนของระบบนั้นๆ ออกไปจากวงจรเครือข่าย (Network) ความผิดพลาดตามเฟสสามารถจำลองได้ โดยการกำหนดค่าของแรงดันบัลต์ที่ผิดพลาดให้เป็นศูนย์ แล้วทำการแก้สมการวงจรเครือข่าย เพื่อหาพฤติกรรมของระบบทันทีหลังจากเกิดการรบกวนระบบแบบนั้นๆ ขึ้น

วิธีการที่ใช้สำหรับการหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow Solution) สามารถนำมาใช้กับวงจรเครือข่ายเพื่อหาค่าแรงดันใหม่ได้ โดยใช้การคำนวณซ้ำ (Iterative Calculation) บัลต์ที่อยู่หลังค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าจะมีการคิดที่แตกต่างออกไป ขึ้นอยู่กับแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อเครื่องจักรไฟฟ้าถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันคงที่หลังค่าพารามิเตอร์รีแอกแตนซ์ ค่าแรงดันภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณซ้ำ แต่ถ้าเครื่องจักรไฟฟ้าถูกแทนด้วยแบบจำลองที่มีองค์ประกอบในแกนตรง (Direct Axis) และแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) ค่าแรงดันภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าจะคงที่ระหว่างการคำนวณซ้ำในแต่ละรอบเท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดแต่ละรอบของการคำนวณ ค่าแรงดัน E_{qi} จะต้องได้รับการคำนวณใหม่เพื่อแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ชั่ว E_{ii} ก่อนอื่นค่าแรงดันใหม่สำหรับบัลต์ภายในสามารถคำนวณได้จากกระแสค่าใหม่ที่ชั่วของเครื่องจักรไฟฟ้า ดังสมการที่ (5.15)

$$I_{ii}^{k+1} = (E_{qi}^k - E_{ii}^{k+1}) \frac{1}{r_{ai} + jX_{qi}} \quad (5.15)$$

จากนั้นก็เป็นการคำนวณค่าใหม่ขององค์ประกอบกระแสในแกนตรง (Direct Axis) แล้ว จะสามารถคำนวณค่าของแรงดันหลังค่าซิงโครไนส์รีแอคแตนซ์ในแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) ได้จากสมการที่ (5.16)

$$E_{qi}^{k+1} = E_{qi(0)}' + (X_{qi} - X_{di}') I_{di}^{k+1} \quad (5.16)$$

เมื่อ $E_{qi(0)}'$ และ $\delta_{i(0)}$ ซึ่งเป็นมุมเฟสของแรงดัน E_{qi} มีค่าคงที่ ค่าผลเฉลยของวงจรเครือข่ายที่ได้ คือ ค่ากระแสที่ชั่วของเครื่องจักรไฟฟ้า จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ในลำดับต่อไป โดยนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นของเครื่องจักรไฟฟ้า ดังสมการ

$$P_{ei(0)} = \text{Re}(I_{di(0)} E_{i(0)}^*) \quad (5.17)$$

เมื่อขนาดของแรงดันหลังค่าทรานเซียนตรีแอคแตนซ์มีค่าคงที่ และ

$$P_{ei(0)} = \text{Re}(I_{di(0)} E_{qi(0)}^*) \quad (5.18)$$

เมื่อคิดผลของลักษณะชั่วยี่นเด่น (Saliency) และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (Changes in Field Flux Linkages) นอกจากนี้ยังได้ค่าเริ่มต้นของแรงดัน $E_{qi(0)}$ อีกด้วย จากผลเฉลยของวงจรเครือข่ายในทันทีหลังจากเกิดการรบกวนระบบขึ้น

5.3.2 การหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ (Differential Equation Calculations)

เมื่อเครื่องจักรไฟฟ้าถูกแทนด้วยค่าแรงดันคงที่หลังค่าทรานเซียนตรีแอคแตนซ์ มีความจำเป็นที่จะต้องแก้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง 2 สมการด้วยกัน เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันภายใน δ , และความเร็วของเครื่องจักร ω , ดังนั้น ถ้าระบบประกอบไปด้วยเครื่องจักร m ตัว แล้ว ในการแก้สมการอนุพันธ์จะประกอบไปด้วยสมการ $2m$ สมการ ดังนี้

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

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}(t)) ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.19)$$

โดยค่าของ P_{mi} จะคงที่ เมื่อไม่ได้คิดผลของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) จะได้

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

เมื่อแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้ามีการคิดผลของลักษณะชั่วย่นเด่น (Saliency) และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (Changes in Field Flux Linkages) แล้ว สมการอนุพันธ์ที่จำเป็นต้องหามาผลเฉลยไปพร้อมกัน มีดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_i(t) - 2\pi f \\ \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}(t)) \\ \frac{dE_{fi}}{dt} &= \frac{1}{\tau_{dot}} (E_{FDi} - E_{fi}) ; \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5.20)$$

โดยค่าของ P_{mi} และ E_{FDi} จะคงที่ เมื่อไม่ได้คิดผลของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) และระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) นั่นคือ

$$P_{mi} = P_{mi(o)} \quad \text{และ} \quad E_{FDi} = E_{FDi(o)} \quad \text{ตามลำดับ}$$

ส่วนในกรณีที่มีการคิดผลของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) และระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) ด้วยแล้ว จำนวนสมการอนุพันธ์ที่ต้องหามาผลเฉลยไปพร้อมๆ กันจะเพิ่มขึ้นตามแบบจำลองที่เลือกใช้ ดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ประกอบด้วยสมการอนุพันธ์ 5 สมการ ในการหาค่าของ P_{mi} ที่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) จะประกอบด้วยสมการอนุพันธ์อีก 4 สมการ ในการหาค่าของ E_{FDi} ที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ถ้าระบบประกอบไปด้วยเครื่องจักรไฟฟ้า m ตัวแล้ว ในการแก้สมการอนุพันธ์ จะมีสมการทั้งหมด $12m$ สมการด้วยกัน

วิธีการแก้สมการอนุพันธ์นั้นทำได้โดยการใช้วิธีการคำนวณเชิงจำนวน (Numerical Method) ซึ่งก็มีอยู่หลายแบบ ได้แก่ Trapezoidal Rule of Integration, Modified Euler Method และ Runge-Kutta 4th Order Method เป็นต้น การที่เลือกใช้วิธี Modified Euler Method นี้เนื่องจากเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ.. มีลักษณะง่ายตรงไปตรงมา วิธีการก็คือ ใช้การคำนวณซ้ำ (Iterative Calculation) เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย [9]

$$\frac{dy^{(i)}}{dx_{(ave)}} = \frac{h}{2} \left(\left. \frac{dy}{dx} \right|_0 + \left. \frac{dy}{dx} \right|_1^{(i-1)} \right) \quad (5.21)$$

เมื่อ h เป็นช่วงของค่า x ที่ใช้ในการคำนวณซ้ำจนกว่าค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยดังกล่าว จะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้

การนำวิธีการดังกล่าวมาแก้สมการการแกว่ง โดยเริ่มจากเมื่อแก้สมการพีชคณิตเรียบร้อยแล้ว นำเอาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาหาค่ากระแสที่ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้า จากนั้นจะได้ค่ากำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าที่เวลาใดๆ $P_{e(t)}$ เมื่อได้ค่า $P_{e(t)}$ แล้วก็จะนำมาใช้หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมและความเร็วทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในส่วนของ การหาความเร็วถ้ามีการคิดผลของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ด้วยแล้ว ต้องทำการแก้สมการอนุพันธ์เพื่อหา P_{mi} ในส่วนของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ออกมาก่อน แล้วจึงนำไปหาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้าได้ จากนั้นก็จะนำค่า δ ที่ได้ไปกำหนดแรงดันภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งถ้ามีการใช้แบบจำลองอย่างง่าย ค่าของ δ จะใช้กับแรงดันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดเท่าเดิมแต่มุมเปลี่ยนไป

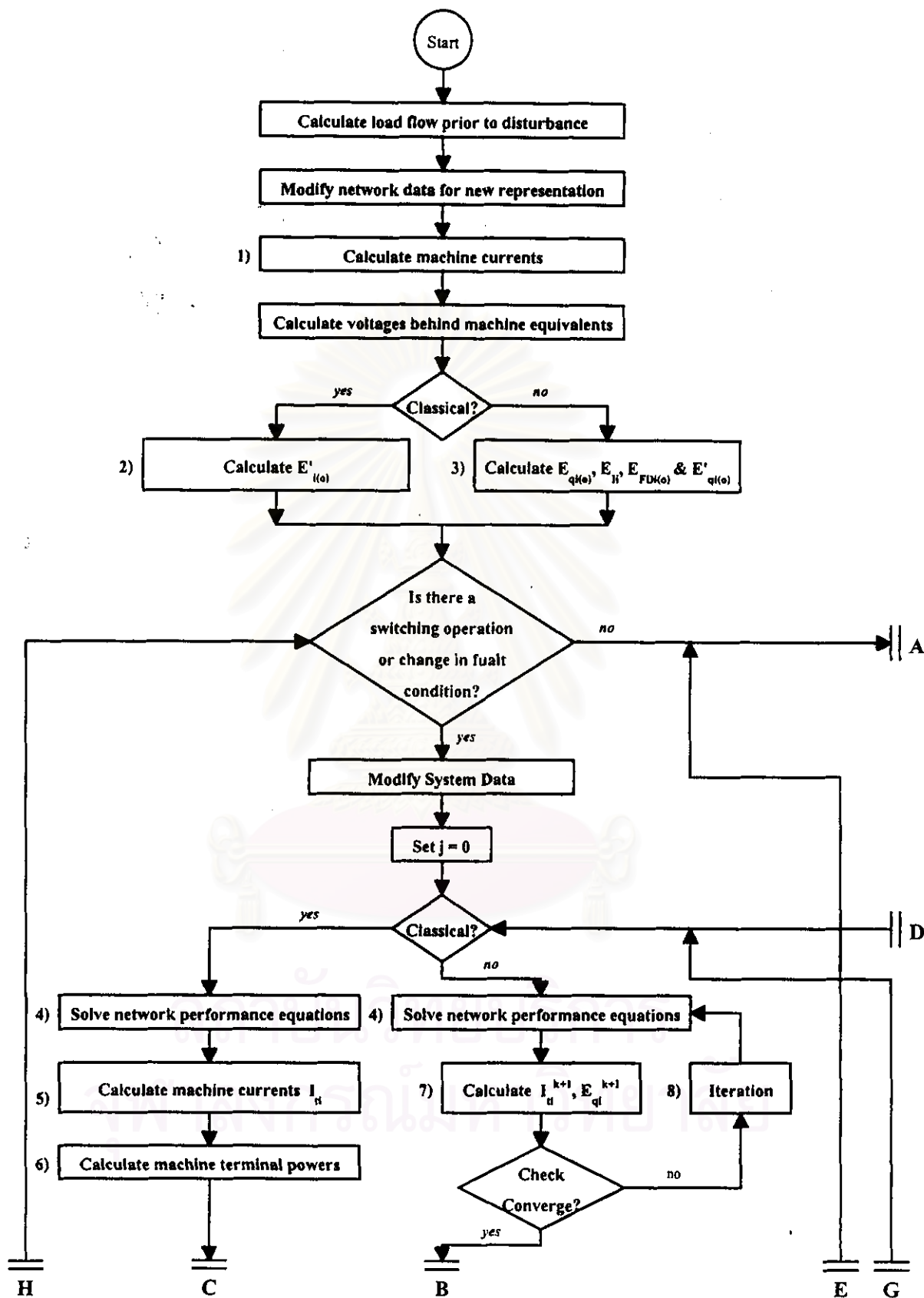
กรณีที่เกิดผลของลักษณะขั้วยื่นเด่น (Saliency) และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (Changes in Field Flux Linkages) แรงดันภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงดันสนาม E_{FDi} ซึ่งควบคุมโดยระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) อีกทีหนึ่ง ทำให้ต้องมีการแก้สมการอนุพันธ์เพื่อหา E_{FDi} ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จากนั้นจึงจะหาแรงดันภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าที่แท้จริงได้

ต่อจากนั้นก็นำค่าแรงดันภายในเครื่องจักรไฟฟ้าใหม่ที่ได้มานี้ ไปใช้ในการแก้สมการพีชคณิต จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าของทุกบัส จากนั้นก็นำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ มาหาค่ากระแสที่ขั้วของ

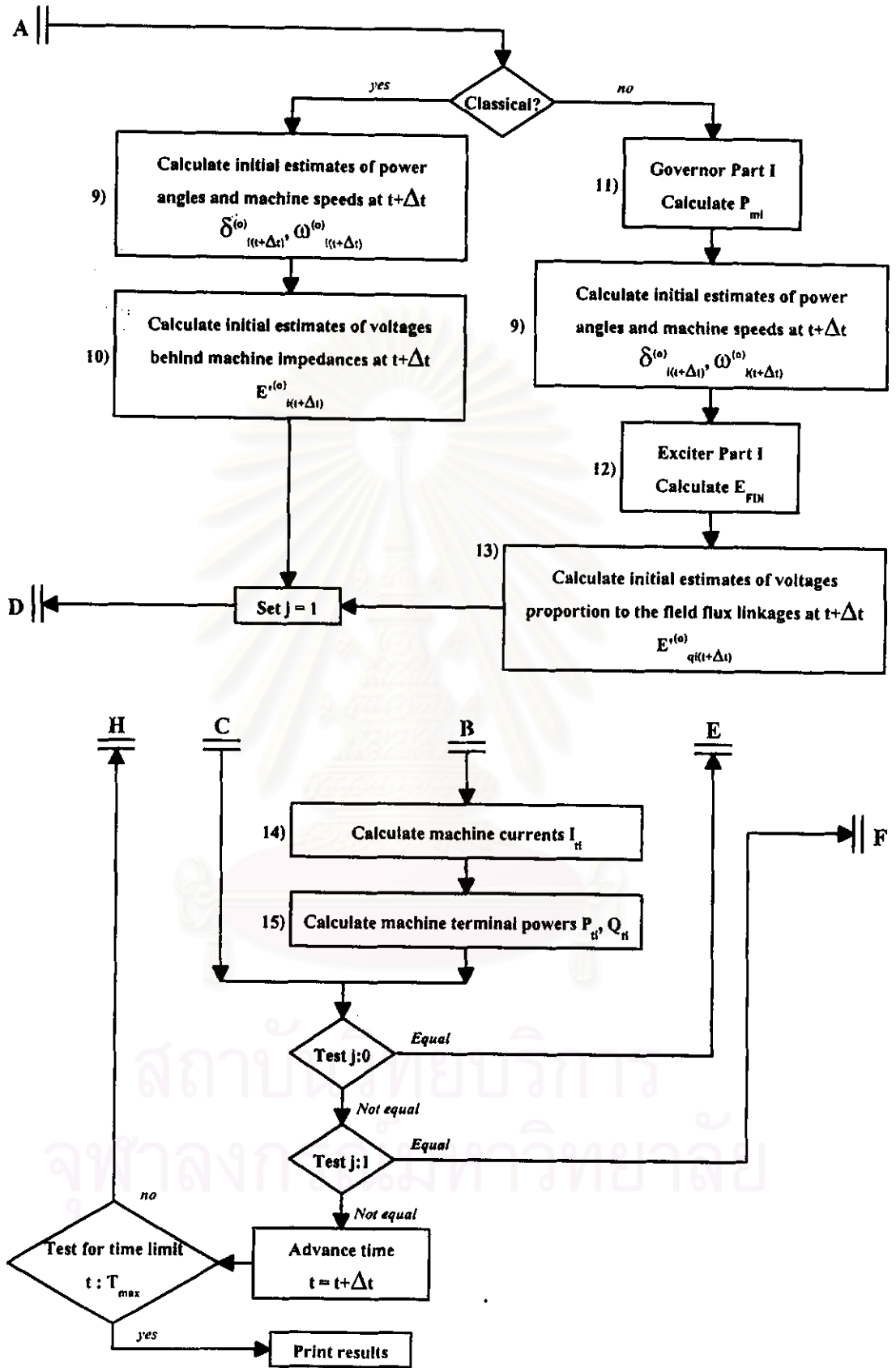
เครื่องจักรไฟฟ้า และค่า $P_{e(i)}$ ค่าใหม่ ทำเช่นนี้ไปจนกว่าค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุม และความเร็วเฉลี่ยของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนในการแก้สมการทั้งสองแบบในระยะเวลาหนึ่ง ต่อไปเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอีก 1 ขั้นตอนเวลา (Time Step) ก็เริ่มต้นคำนวณใหม่ตามขั้นตอนเดิม จนถึงเวลาสิ้นสุดการวิเคราะห์ที่ได้กำหนดไว้

5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า [9,13,18]

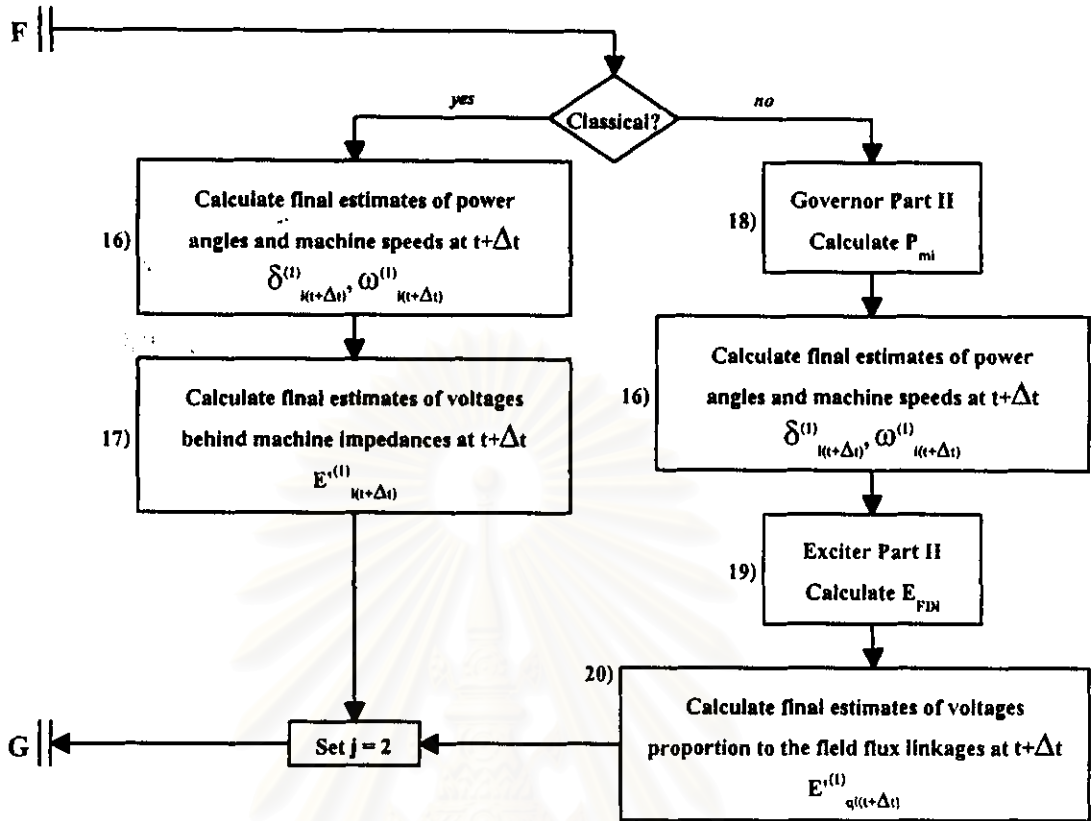
จากหัวข้อต่างๆ ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ได้มีการแยกพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าออกเป็นส่วนๆ ได้แก่ สมการการแกว่ง (Swing Equation) สมการระบบไฟฟ้า (Power System Equation) และวิธีการหาผลเฉลย (Solution Techniques) ในหัวข้อนี้จะได้ทำการรวมส่วนสำคัญทั้งสามของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยจะทำการแสดงในรูปของแผนผัง (Flowchart) ที่เป็นขั้นตอนอย่างละเอียดชัดเจน พร้อมด้วยสมการที่ใช้คำนวณในแต่ละส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เป็นแผนผังการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งมีการรวมส่วนของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) และระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) เอาไว้ด้วย เพื่อความชัดเจนในการศึกษามากยิ่งขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 5.1 แผนผังการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.1 แผนผังการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)



รูปที่ 5.1 แผนผังการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

สรุปสมการที่แสดงในแผนผัง (Flowchart) มีดังต่อไปนี้ [13]

- 1). Calculate machine currents; I_{ii}

$$I_{ii} = \frac{P_{ii} - jQ_{ii}}{E_{ii}^*}; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

- 2). Calculate $E_{i(0)}^{\prime}$ (Voltage behind machine equivalents)

$$E_{i(0)}^{\prime} = E_{ii} + r_{ai} I_{ii} + jX_{di}^{\prime} I_{di}; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

- 3). Calculate $E_{qi(0)}$, E_{ii} , $E_{FDi(0)}$, & $E_{qi(0)}^{\prime}$

$$E_{qi(0)} = E_{ii} + r_{ai} I_{ii} + jX_{qi} I_{qi}$$

$$E_{ii} = E_{ii} + r_{ai} I_{ii} + jX_{di}^{\prime} I_{di} + jX_{qi} I_{qi}$$

$$E_{FDi(0)} = E_{ii}$$

$$E_{qi(0)}^{\prime} = E_{qi(0)} - (X_{qi} - X_{di}^{\prime}) I_{di}; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

4). Solve network performance equations

$$E_p^{k+1} = -\sum_{q=1}^{p-1} YL_{pq} E_q^{k+1} - \sum_{q=p+1}^n YL_{pq} E_q^k - \sum_{i=1}^m YL_{pi} E_i'$$

$p = 1, 2, \dots, n$ (Number of buses) $p \neq f$ (when fault on bus f)

5). Calculate machine currents; I_{ii}

$$I_{ii} = \frac{(E_i' - E_{ii})}{r_{di} + jX_{di}'} ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

6). Calculate machine terminal powers

$$P_{ii} - jQ_{ii} = I_{ii} E_{ii}^* ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

7). Calculate $I_{qi}^{(k+1)}$, $E_{qi}^{(k+1)}$

$$I_{ii}^{(k+1)} = \frac{(E_{qi}^{(k)} - E_{ii}^{(k+1)})}{r_{di} + jX_{qi}'} ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$E_{qi}^{(k+1)} = E_{qi}' + (X_{qi}' - X_{di}') I_{ii}^{(k+1)} ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

8). Iteration

$$E_{qi}^{(k)} = E_{qi}^{(k+1)} \angle \delta_i ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

9). Calculate initial estimates of power angles and machine speeds at $t+\Delta t$

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

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t)} \Delta t ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

10). Calculate initial estimates of voltages behind machine impedances at $t+\Delta t$

$$e_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = |E_i'| \cos \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)}$$

$$f_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = |E_i'| \sin \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)} ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

11). Governor Part I Calculate P_{mi}

$$P_{1i}^{(0)} = \frac{\Delta \omega_i}{R_i}$$

$$P_{REFI(t+\Delta t)}^{(0)} = P_{REFI(t)}^{(1)} + \left. \frac{dP_{REFI}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t$$

$$P_{2i}^{(0)} = -P_{REFI(t+\Delta t)}^{(0)} - P_{1i}^{(0)}$$

$$P_{3i(t+\Delta t)}^{(0)} = P_{3i(t)}^{(1)} + \left. \frac{dP_{3i}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t ; \quad P_{\min} \leq P_{3i(t+\Delta t)}^{(0)} \leq P_{\max}$$

$$P_{4i(t+\Delta t)}^{(0)} = P_{4i(t)}^{(1)} + \left. \frac{dP_{4i}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t$$

$$P_{si(t+\Delta t)}^{(o)} = P_{si(t)}^{(1)} + \left. \frac{dP_{si}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t$$

$$P_{mi(t+\Delta t)}^{(o)} = P_{mi(t)}^{(1)} + \left. \frac{dP_{mi}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

12). Exciter Part I Calculate E_{FDI}

$$V_{si(t+\Delta t)}^{(o)} = V_{si(t)}^{(1)} + \left. \frac{dV_{si}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t$$

$$V_{3i(t+\Delta t)}^{(o)} = V_{3i(t)}^{(1)} + \left. \frac{dV_{3i}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t ; \quad V_{3\min} \leq V_{3i(t+\Delta t)}^{(o)} \leq V_{3\max}$$

$$V_{6i}^{(o)} = S_E E_{FDI(t)}^{(1)}$$

$$V_{2i}^{(o)} = V_{3i(t+\Delta t)}^{(o)} - V_{6i}^{(o)}$$

$$E_{FDI(t+\Delta t)}^{(o)} = E_{FDI(t)}^{(1)} + \left. \frac{dE_{FDI}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t$$

$$V_{4i(t+\Delta t)}^{(o)} = V_{4i(t)}^{(1)} + \left. \frac{dV_{4i}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

13). Calculate initial estimates of voltages proportion to the field flux linkages at

$t+\Delta t$

$$E_{qi(t+\Delta t)}^{(o)} = E_{qi(t)}^{(1)} + \left. \frac{dE_{qi}}{dt} \right|_{(t)} \Delta t ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

14). Calculate machine currents; I_{ii}

$$I_{ii} = \frac{(E_{qi} - E_{ii})}{r_{ai} + jX_{qi}} ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

15). Calculate machine terminal powers

$$P_{ii} - jQ_{ii} = I_{ii} E_{ii}^* ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

16). Calculate final estimates of power angles and machine speeds at $t+\Delta t$

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

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

17). Calculate final estimates of voltages behind machine impedances at $t+\Delta t$

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

$$f_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = |E_i'| \sin \delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)} ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$