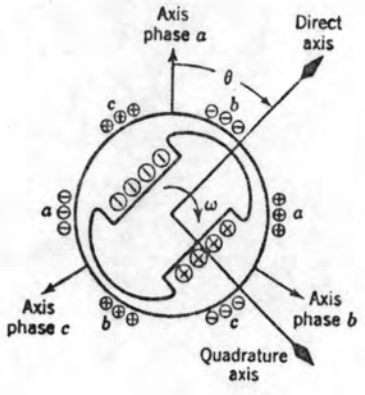
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย

3.1 การแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในภาวะทรานเซียนต์[3,5,8]

การวิเคราะห์เสถียรภาพในภาวะทรานเซียนต์เป็นการศึกษาถึงความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ยังเชื่อมโยงกันอยู่ในระบบ (Synchronism) หลังจากเกิดการผิดปกติอย่างมากในระบบ โดยศึกษาในช่วง 1 ถึง 2 วินาทีหลังจากเกิดการผิดปกติดังกล่าว ดังนั้นในภาวะทรานเซียนต์นี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจแทนด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันที่มีขนาดคงที่แต่เฟสเปลี่ยนแปลงไปและต่ออยู่หลังทรานเซียนต์รีแอคแทนซ์ การแทนเช่นนี้โดยทั่วไปไม่คิดผลของ Saliency และสมมุติว่าฟลักซ์ลิงเคจคงที่ (Constant Flux Linkage) แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ การวิเคราะห์ดังกล่าวได้คิดผลของ Saliency และการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ลิงเคจซึ่งเกิดจากผลของโวลเตจเรกูเลเตอร์ด้วย ดังนั้นปริมาณต่าง ๆ ในแต่ละเฟสมีการแปลง (Transform) ให้อยู่ในแกนไดเรคต์ (Direct Axis) ซึ่งอยู่ในแนวแกนของโรเตอร์และแกนควอดราเจอร์ (Quadrature Axis) ซึ่งนำหน้าแกนไดเรคต์ตามทิศทางการหมุน 90 องศา ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในกรณีที่ไม่คิดผลของขดลวดแดมเปอร์(Damper Winding) การอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก(Saturation) และความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ เราอาจคำนวณหาตำแหน่งแกนควอดราเจอร์โดยการคำนวณหาแรงดันหลังซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแกนควอดราเจอร์ได้ดังนี้

$$E_q = E_t + jX_q I_t \tag{3.1}$$

โดยที่ E_q คือแรงดันหลังซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแกนควอดราเจอร์

X_q คือ ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแกนควอดราเจอร์

ฟลักซ์แม่เหล็กรูปไซน์ที่เกิดจากกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก(Field current) อยู่ในแกนไดเรคต์และเหนี่ยวนำแรงดันซึ่งล้าหลังฟลักซ์ 90 องศาและอยู่ในแกนควอดราเจอร์ ซึ่งสามารถหาได้โดยรวมแรงดันที่ขั้ว (E_t) ด้วยแรงดันตกที่แทนผลของdemagnetizingในแกนไดเรคต์และแกนควอดราเจอร์ โดยมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$E_I = E_t + j X_d I_d + jX_q I_q \tag{3.2}$$

และขนาดของแรงดัน E_I คำนวณได้จากสมการ

$$E_I = \left(\frac{X_d - X'_d}{X_q - X'_d}\right) E_q + \left(\frac{X_q - X_d}{X_q - X'_d}\right) e'_q \tag{3.3}$$

ส่วนประกอบในแกนควอดราเจอร์ของแรงดันหลังทรานเซียนต์รีแอคแตนซ์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$e'_q = E_q - j\,(X_q - X'_d)\; I_d \tag{3.4}$$

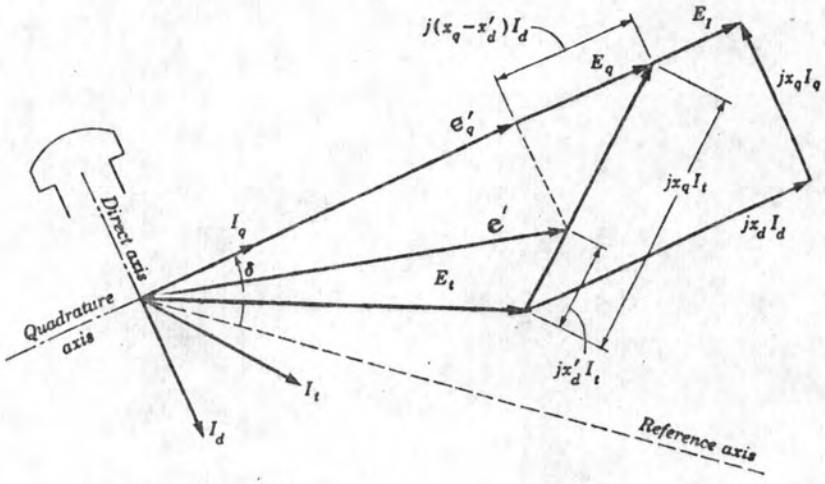
โดยที่ e'_q คือแรงดันที่เป็นสัดส่วนกับฟลักซ์ลิงเคจ (Field Flux Linkages) ซึ่งได้จากผลรวมของกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กและกระแสอาเมเจอร์ และมีขนาดดังนี้

$$\left|e'_q\right| = \left|E_q\right| - \frac{(X_q - X'_d)}{\left|E_q\right|} \cdot \left(\mathrm{Im}\left[E_q\right]\mathrm{Re}\left[I_t\right] - \mathrm{Re}\left[E_q\right]\mathrm{Im}\left[I_t\right]\right) \tag{3.5}$$

โดยที่ $\left|e'_q\right|$และ $\left|E_q\right|$ คือขนาดแรงดัน e'_q และ E_q ตามลำดับ

$\mathrm{Re}\left[...\right]$และ $\mathrm{Im}\left[...\right]$ คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพตามลำดับ

เราสามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดง E_I และแรงดันหลังทรานเซียนต์รีแอคแตนซ์ได้ โดยใช้สมการ (3.1), (3.2) และ (3.4) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยที่ E_t = terminal voltage

I_t = terminal current

e' = voltage back of transient reactance X'_q

E_q = voltage back of q-axis synchronous reactance X_q

e'_q = voltage proportional to field flux linkages

E_I = voltage proportional to field current

X_d = direct-axis synchronous reactance

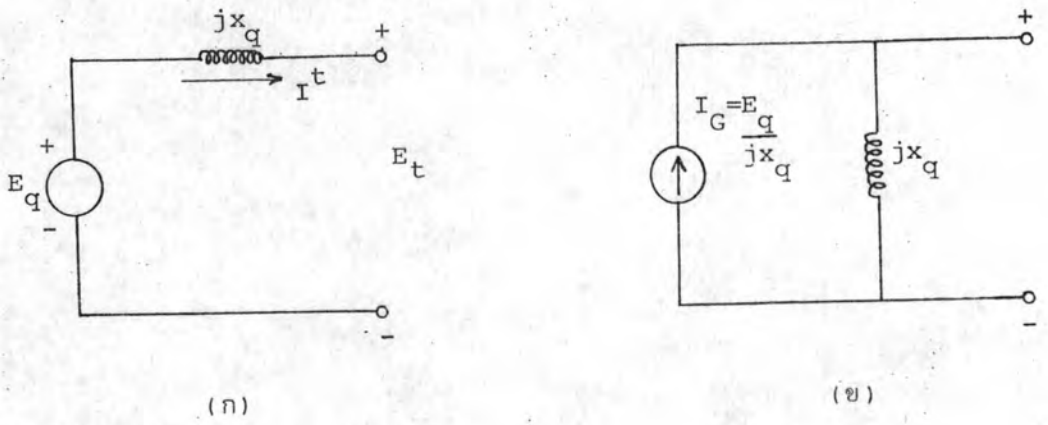
X_q = quadrature-axis synchronous reactance

X'_d = transient reactance

I_d = direct-axis component of I_t

I_q = quadrature-axis component of I_t

δ = angle between q-axis and system reference axis



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เนื่องจากฟลักซ์ลิงเคจไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโดยกระทันหันหลังจากเกิดความผิดปกติ เช่นเดียวกันกับ e'_q ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโดยกระทันหันได้ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ e'_q ในแกนควอดราเจอร์นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันสนามแม่เหล็ก(Field Voltage, E_{fd})ซึ่งควบคุมโดยโวลเตจเรกูเลเตอร์ แรงดันที่เป็นสัดส่วนกับกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก (E_I) และค่าคงตัวเวลา (Time constant) ของวงจรโรเตอร์เมื่อสเตเตอร์เปิดวงจร (T'_{do}) ตามสมการ

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E_I) \qquad (3.6)$$

โดยที่ E_{fd} คือ แรงดันสนามแม่เหล็กในแนวแกนควอดราเจอร์

และ T'_{do} คือ ค่าคงตัวเวลาของวงจรโรเตอร์เมื่อสเตเตอร์เปิดวงจร

แรงดัน E_q ก่อนเกิดความผิดปกติสามารถคำนวณได้จาก

$$E_q = E_t + jX_q I_t \qquad (3.7)$$

โดยที่ E_t และ I_t ได้มาจากการคำนวณโหลดโฟลว์ และค่าเริ่มต้นของ e'_q คำนวณได้จากสมการ (3.5)

ในภาวะทรานเซียนต์ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ (δ) ซึ่งคือเฟสของแรงดัน E_q สามารถคำนวณจากสมการสวิง (Swing Equation) และขนาดของแรงดัน E_q มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้ขนาดของแรงดัน e'_q ตามสมการ (3.5)

3.2 สมการสวิง[10] (Swing Equation)

สมการสวิงเป็นสมการอนุพันธ์ซึ่งกำหนดตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในภาวะต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการสวิงเป็นตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวเทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบถึงเสถียรภาพของระบบที่พิจารณา

การหมุนของโรเตอร์คำนวณได้จาก*

$$J\ddot{\theta}_m = T \qquad \text{N-m} \tag{3.8}$$

โดยที่ J คือโมเมนต์ของความเฉื่อยของโรเตอร์ ($Kg.m^2$)

θ_m คือมุมทางกล (Mechanical Angle) ของแกนโรเตอร์เทียบกับแกนอ้างอิง

T คือผลรวมทางฟิสิกส์ของแรงบิดที่กระทำต่อเพลาของโรเตอร์ (N-m)

มุมทางไฟฟ้า (Electrical Angle) θ_e มีความสัมพันธ์กับมุมทางกล θ_m ดังสมการ

$$\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m \tag{3.9}$$

โดยที่ P คือ จำนวนขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

และความถี่ f (H_Z) มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบ (rpm) และจำนวนขั้ว (P) ดังสมการ

$$f = \frac{P}{2}\frac{rpm}{60} \tag{3.10}$$

ดังนั้น จากสมการ (3.9) และ (3.10) จะได้

$$\theta_e = \frac{60f}{rpm}\theta_m \tag{3.11}$$

---

* เครื่องหมาย • แสดงถึงอนุพันธ์เทียบกับเวลา เช่น $\dot{X} = \frac{dx}{dt}$, $\ddot{X} = \frac{d^2x}{dt^2}$

ตำแหน่งเชิงมุมทางไฟฟ้า (δ) ของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสคำนวณได้จาก

$$\delta = \theta_e - \omega_o t \qquad (3.12)$$

โดยที่ ω_o คือความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (rad/sec)

t คือเวลา (sec)

ดังนั้น $$\ddot{\delta} = \ddot{\theta}_e = \frac{60f}{rpm} \ddot{\theta}_m$$

แทนค่า θ_m ในสมการ (3.8) จะได้

$$T = J \frac{rpm}{60f} \ddot{\delta}$$

ถ้าคิดแรงบิดเป็นค่าต่อหน่วย (Per Unit) โดยที่ค่าฐานของแรงบิด (Base Torque) คือแรงบิดที่ทำให้ได้กำลังและความเร็วรอบที่พิกัด ดังนั้น

$$\text{Base Torque} = \frac{\text{base KVA} \times 10^3}{2\pi \left(\frac{rpm}{60}\right)} \quad \text{N-m}$$

และแรงบิดเป็นค่าต่อหน่วย สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T_{PU} = \frac{J \frac{2\pi}{f} \left(\frac{rpm}{60}\right)^2 \ddot{\delta}}{\text{base KVA} \times 10^3} \quad \text{PU.} \qquad (3.13)$$

ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องจักร (H) คือ อัตราส่วนของพลังงานจลน์ที่ความเร็วพิกัด คิดเป็นกิโลวัตต์-วินาที ต่อ เค.วี.เอ ของเครื่องจักรซึ่ง

$$\text{พลังงานจลน์} = \frac{1}{2} J \omega_o^2 \times 10^{-3} \quad \text{KN-m}$$

โดยที่ $$\omega_o = 2\pi \frac{rpm}{60}$$

และ rpm คือความเร็วที่พิกัด

ดังนั้น $$H = \frac{\frac{1}{2} J (2\pi)^2 \left(\frac{rpm}{60}\right)^2 \times 10^{-3}}{\text{base KVA}} \qquad (3.14)$$

แทนสมการ (3.14) ในสมการ (3.13) จะได้

$$T_{PU} = \frac{H}{\pi f}\ddot{\delta} \qquad (3.15)$$

แรงบิดที่กระทำบนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วยแรงบิดทางกล (Tm) จากเครื่องต้นกำลังและแรงบิดทางไฟฟ้า (Te) ดังนั้น สมการ (3.15) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{H}{\pi f}\ddot{\delta} = Tm-Te \qquad (3.16)$$

ในภาวะทรานเซียนต์ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่เปลี่ยนไปมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วที่พิกัด จึงทำให้ค่าแรงบิดและค่ากำลังงานที่คิดเป็นค่าต่อหน่วย (Per Unit) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมการสวิงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\ddot{\delta} = \frac{\pi f}{H}(Pm - Pe) \qquad (3.17)$$

โดยที่ Pm คือ กำลังงานทางกล เป็นค่าต่อหน่วย

Pe คือ กำลังงานไฟฟ้า เป็นค่าต่อหน่วย

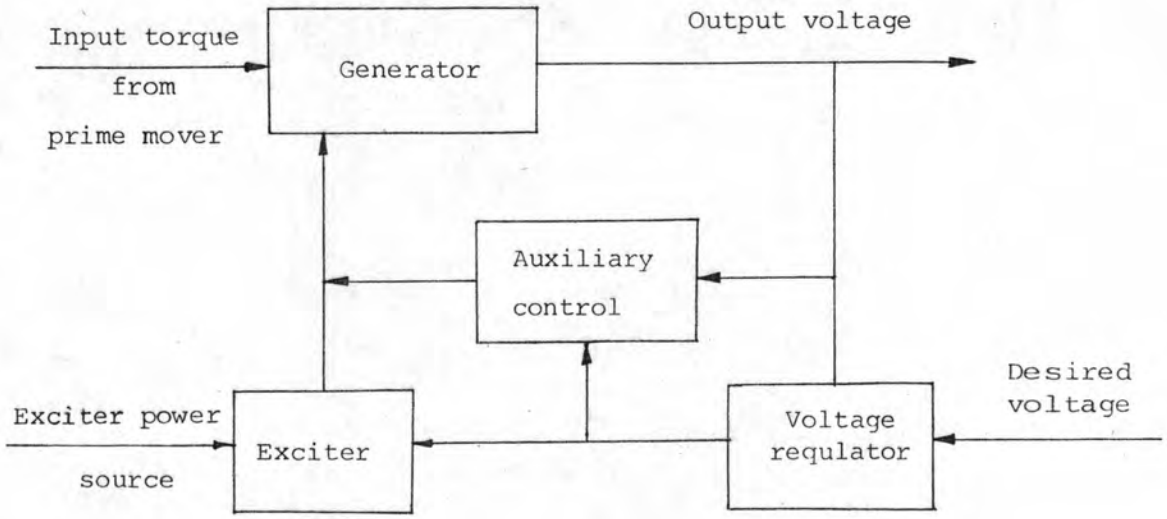
จากสมการ (3.17) และ (3.12) สามารถเขียนสมการสวิงเป็นสมการอนุพันธ์อันดับ 1 ได้ดังนี้

$$\dot{\omega} = \frac{\pi f}{H}(Pm - Pe) \qquad (3.18)$$

$$\dot{\delta} = \omega - 2\pi f \qquad (3.19)$$

3.3 ระบบเอกไซเตชัน (Excitation System)

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นอาจแบ่งการควบคุม[6]เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การควบคุมความถี่และการควบคุมระดับแรงดัน การควบคุมความถี่เป็นการปรับกำลังงานจริง (Real Power) ที่จ่ายให้ระบบให้พอเหมาะกับโหลดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อรักษาค่าความถี่ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ การควบคุมในส่วนนี้กระทำโดยการปรับกำลังงานกลที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งควบคุมโดยโกวเวอร์เนอร์ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป ส่วนการควบคุมระดับแรงดันนั้นเป็นการปรับกำลังงานรีแอคทีฟ (Reactive Power) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ/หรืออุปกรณ์จ่ายกำลังงานรีแอคทีฟ เพื่อให้ระดับแรงดันที่บัสต่าง ๆ ของระบบเป็นไปตามต้องการ การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในส่วนนี้ อาจทำโดยการปรับแรงดันสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ควบคุมโดยระบบเอกไซเตชัน (Excitation System) ซึ่งประกอบด้วยโวลเตจเรกูเลเตอร์ (Voltage Regulator) เอกไซเตอร์ (Exciter) และวงจรควบคุมอื่น ๆ (Auxiliary control) ตามที่แสดงในรูปที่ 3.4 โดยที่โวลเตจเรกูเลเตอร์เป็นตัวเปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัสกับขนาดแรงดันที่ต้องการ แล้วส่งผลไปควบคุมแรงดันเอาท์พุทของเอกไซเตอร์ ทำให้แรงดันสนามแม่เหล็กของเครื่องจักรอยู่ในระดับที่เหมาะสมและได้แรงดันที่บัสตามต้องการ



รูปที่ 3.4 ส่วนต่าง ๆ ของระบบเอกไซเตชัน

เอกไซเตอร์ซึ่งเป็นตัวจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับวงจรสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ อาจแบ่งได้หลายแบบ[1] เช่น เอกไซเตอร์แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC. Generator) ที่ให้แรงดันกระแสตรงจากแปรงถ่าน ซึ่งสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) หรืออาจเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternator) ซึ่งแรงดันกระแสสลับเปลี่ยนเป็นกระแสตรงโดยตัวเรียงกระแส (Rectifiers) เอกไซเตอร์แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้อาจได้กำลังงานกลจากการขับของมอเตอร์ หรือขับจากเพลาของเครื่องจักรซิงโครนัส นอกจากนี้ยังมีเอกไซเตอร์ชนิดที่แปลงแรงดันกระแสสลับจากขั้วของเครื่องจักรซิงโครนัส หรือจากแหล่งแรงดันอื่น ๆ เป็นแรงดันกระแสตรงโดยตัวเรียงกระแสที่สามารถควบคุมแรงดันได้

โวลเตจเรกูเลเตอร์เป็นตัวเปรียบเทียบระดับแรงดันที่บัสกับขนาดแรงดันที่ต้องการ แล้วส่งผลการเปรียบเทียบไปควบคุมเอกไซเตอร์ โวลเตจเรกูเลเตอร์ประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Error Detector) วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) และวงจรควบคุมอื่น ๆ (Auxiliary Input) การทำงานของโวลเตจเรกูเลเตอร์อาจมีทั้งแบบทำงานต่อเนื่อง ซึ่งทำงานทันทีที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และแบบทำงานไม่ต่อเนื่องซึ่งทำงานต่อเมื่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันถึงระดับที่กำหนด

วงจรควบคุมอื่น ๆ อาจประกอบด้วยสเตบิไลเซอร์ (Stabilizers) ซึ่งช่วยปรับปรุงผลตอบสนอง (Response) ของระบบเอกไซเตชัน นอกจากนี้อาจมีวงจรจำกัดสัญญาณ (Limiter) ซึ่งจำกัดสัญญาณไม่ให้สูงหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนด

ระบบเอกไซเตชันที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด รูปที่ 3.5 ก. แสดงบล็อคไดอะแกรมของระบบเอกไซเตชันชนิดหนึ่ง[10] โดยที่การเปรียบเทียบแรงดันกระทำโดยโวลเตจเรกูเลเตอร์ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) T_R ซึ่งสัญญาณความแตกต่างนี้รวมกับสัญญาณจากสเตบิไลซิงลูป (Stabilizing Loop) และสัญญาณอื่น ๆ ถูกขยายโดยวงจรขยายสัญญาณซึ่งมีค่าคงตัวเวลา T_A และมีอัตราขยายแรงดัน K_A จากนั้นลบสัญญาณดังกล่าวด้วยสัญญาณที่ใช้แทนผลของการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation Effect) แล้วส่งสัญญาณที่ได้ไปควบคุมเอกไซเตอร์ที่มีค่าคงตัวเวลา T_E และอัตราขยายแรงดัน K_E

ในทางปฏิบัติ T_R และ T_A มีค่าน้อยมาก เพื่อเป็นการลดตัวแปรในการเขียนโปรแกรมจึงสมมุติให้ T_R และ T_A มีค่าเป็นศูนย์ ทั้งไม่คิดผลจากสเตบิไลซิงลูป และผลของการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก และให้แรงดันอ้างอิงคือแรงดันที่ปลายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนเกิดความผิดปกติในระบบ (E_{to}) ดังนั้นระบบเอกไซเตชันที่ใช้ในโปรแกรมนี้ จึงเป็นไปตามบล็อคไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3.5 ข.[5] และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E'_{fd} = E_{fdo} - \mu(E_t - E_{to}) \qquad (3.20)$$

$$\frac{d\,E_{fd}}{dt} = \frac{1}{T_E}(E''_{fd} - E_{fd}) \qquad (3.21)$$

โดยที่ $E_{fdo} = E_{IO}$ (Subscript 'O' หมายถึงค่าก่อนเกิดความผิดปกติ)

$E''_{fd} = E'_{fd}$ ถ้า $E_{fd\ min} < E'_{fd} < E_{fd\ max}$

$E''_{fd} = E_{fd\ max}$ ถ้า $E'_{fd} > E_{fd\ max}$

และ $E''_{fd} = E_{fd\ min}$ ถ้า $E'_{fd} < E_{fd\ min}$

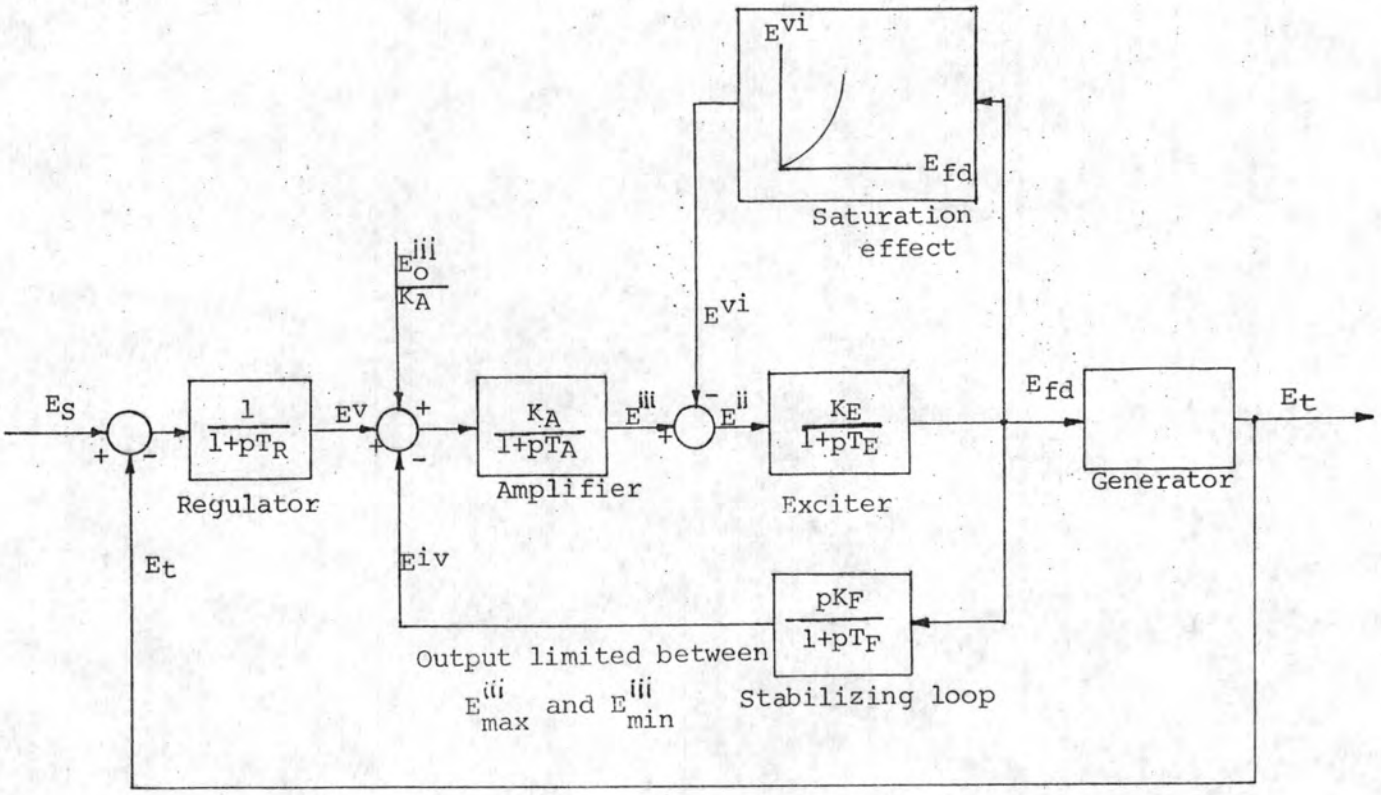
ซึ่ง μ คือ อัตราขยายทั้งหมดของระบบเอกไซเตชัน

T_E คือ ค่าคงตัวเวลาของเอกไซเตอร์ (วินาที)

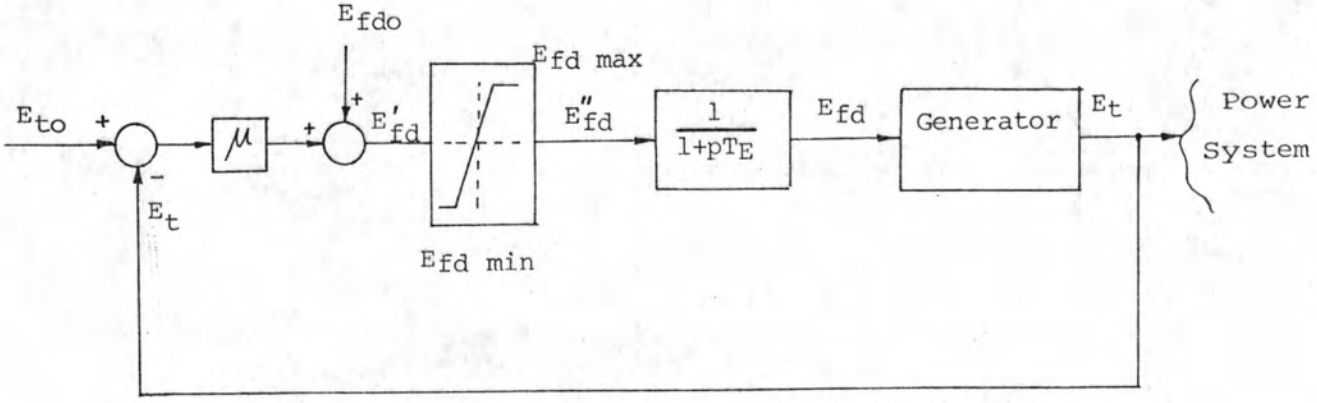
$E_{fd\ min}$ คือ แรงดันต่ำสุดที่กำหนดของเอกไซเตอร์ (Minimum Excitation Voltage)

$E_{fd\ max}$ คือ แรงดันสูงสุดของเอกไซเตอร์ (Ceiling Excitation Voltage)

คุณลักษณะที่สำคัญอันหนึ่งของระบบเอกไซเตชันคือ อัตราส่วนของผลตอบสนองแรงดัน (Voltage Response Ratio) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ระบบเอกไซเตชันชนิดที่มีความเร็วในการตอบสนองสูงจะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพในภาวะทรานเซียนต์ดีกว่าชนิดที่มีความเร็วในการตอบสนองต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มสนามแม่เหล็กอย่างรวดเร็วในช่วงทรานเซียนต์เป็นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย ทำให้ลดความแตกต่างระหว่างกำลังงานกลและกำลังงานไฟฟ้า จึงเป็นผลให้การแกว่งในช่วงแรก (First Swing) ลดลง[1]



(ก) ระบบเอกไซเตชันที่ใช้ทั่วไป



(ข) ระบบเอกไซเตชันที่ใช้ในโปรแกรม

รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบเอกไซเตชัน

3.4 โกวเวอร์เนอร์ (Governor)

ในระบบไฟฟ้ากำลังที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสมดุลย์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด ความถี่ของระบบจะมีค่าคงที่ อย่างไรก็ดีเนื่องจากโหลดในระบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ในแต่ละช่วงเวลาจึงต้องปรับกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้พอเหมาะกับโหลดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ในกรณีที่โหลดเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากพลังงานจลน์ที่สะสมในเครื่องกำเนิดถูกใช้เพื่อชดเชยการเพิ่มของโหลด ดังนั้นจึงต้องเพิ่มกำลังงานกลที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษาความถี่ของระบบให้อยู่ในช่วงที่กำหนด

กำลังงานกลส่วนใหญ่ได้มาจากเครื่องต้นกำลัง (Prime Movers) ที่เปลี่ยนพลังงานของของไหลเป็นพลังงานกล เช่นกังหันไอน้ำ (Steam Turbines) กังหันแก๊ซ (Gas Turbines) และกังหันน้ำ (Hydroturbines) เป็นต้น การควบคุมกำลังงานกลอาจทำโดยควบคุมอัตราการไหลของของไหล โดยที่ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกล (Mechanical Torque) กับความเร็วรอบ (Speed) ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องต้นกำลัง

เครื่องต้นกำลังชนิดที่ไม่มีการควบคุมความเร็วรอบจะมีความสัมพันธ์ของแรงบิด และความเร็วรอบเกือบเป็นเส้นตรงที่จุดทำงานใกล้พิกัด ถ้าให้กำลังงานคงที่ เราอาจเขียนสมการคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้[1]

จากความสัมพันธ์ของแรงบิด Tm และกำลังงานกล Pm จะได้

$$Tm = Pm/\omega \quad N.m \tag{3.22}$$

หรือ
$$dTm = \frac{\partial Tm}{\partial Pm} dPm + \frac{\partial Tm}{\partial \omega} d\omega \quad N.m \tag{3.23}$$

เมื่อ ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

ที่จุดทำงานใกล้พิกัด สมการ (3.23) สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$dTm = (1/\omega_R) dPm - (P_{mR}/\omega_R^2) d\omega \quad N-m \tag{3.24}$$

โดยที่ P_{mR} และ ω_R เป็นกำลังงานและความเร็วเชิงมุมที่พิกัดตามลำดับ

ในกรณีที่กำลังงานกลคงที่นั่นคือ อัตราการไหลของของไหลคงที่ (fix gate) ดังนั้น

$$d_{Pm} = 0$$

และ $$d_{Tm} = -(P_{mR}/\omega_R^2)\,d\omega \quad N\cdot m \tag{3.25}$$

ถ้าให้ T_{mR} คือ แรงบิดฐาน (Base Torque)

ซึ่ง $T_{mR} = P_{mR}/\omega_R$

และ $\frac{d\omega}{\omega_R}$ คือ ความเร็วเชิงมุมที่คิดเป็นค่าต่อหน่วย (Per Unit)

ดังนั้น หารสมการ (3.25) ด้วย T_{mR} จะได้

$$dTm = -d\omega \quad pu. \tag{3.26}$$

โดยที่ T_m และ ω เป็นค่าต่อหน่วย

ความสัมพันธ์ของสมการ (3.26) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ก. นั่นคือ เครื่องต้น-กำลังชนิดที่ไม่มีการควบคุมความเร็วรอบนั้น ความเร็วรอบลดลงในสัดส่วนเดียวกับโหลดที่เพิ่มขึ้น

ในเครื่องต้นกำลังชนิดที่มีการควบคุมความเร็วรอบนั้น มีโกวเวอร์เนอร์ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของของไหลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ความเร็วรอบคงที่ การควบคุมนี้เกิดขึ้นทั้งขณะที่ในสภาวะเปลี่ยนแปลงปกติ และในสภาวะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง ความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องต้นกำลังชนิดที่มีการควบคุมความเร็วรอบแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ข. ถ้าสมมุติให้ความสัมพันธ์นี้เป็นเส้นตรง ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Tm = Tmo - (\omega - \omega_R)/R \quad N.m \tag{3.27}$$

โดยที่ R = Speed Regulation (rad/N.m.S)

คูณสมการ (3.27) ด้วย ω_R จะได้

$$Pm \cong Tm\omega_R = Pmo - \frac{\omega_R}{R}(\omega - \omega_R) \tag{3.28}$$

กำหนดให้ S_B คือ พิกัดของเครื่องจักร

ดังนั้น $Pmu \triangleq Pm/S_B = Pmo/S_B - (\omega_R/S_BR)(\omega - \omega_R)$

หรือ $$Pmu = Pmou - (\omega_R^2/S_BR)(\omega_U - 1) \quad PU. \tag{3.29}$$

Subscript 'U' หมายถึงค่าต่อหน่วย

กำหนดให้ $$R_U \triangleq S_B R / \omega_R^2 \qquad (3.30)$$

โดยที่ R_U = Speed Regulation in per unit

ค่า R_U โดยทั่วไปมักตั้งไว้ที่ 0.05 ซึ่งหมายความว่าถ้าเครื่องต้นกำลังจ่ายกำลังงานจากไม่มีโหลดไปถึงโหลดสูงสุด ความเร็วรอบมีค่าลดลง 5 % ตามที่แสดงในรูปที่ 3.7

สมการ (3.29) สามารถเขียนใหม่ดังนี้

$$Pmu = Pmou - \frac{1}{R_U}(\omega_U - 1) \qquad (3.31)$$

ซึ่งสามารถเขียนบล็อคไดอะแกรมได้ตามที่แสดงในรูปที่ 3.8

ในภาวะทรานเซียนต์ ความเร็วรอบของเครื่องต้นกำลังเปลี่ยนแปลง ทำให้กำลังงานกลเปลี่ยนแปลงตามสมการ (3.31) ถ้าระบบควบคุมและระบบไอน้ำมีค่าคงตัวเวลา T_C และ T_S ตามลำดับ ดังนั้นสามารถเขียนบล็อคไดอะแกรมแทนระบบโกวเวอร์เนอร์[10]ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 และสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{d\,Pm}{dt} = \frac{1}{T_S}(P'm - Pm) \qquad (3.32)$$

$$\frac{d\,P'm}{dt} = \frac{1}{T_C}(P''m - P'm) \qquad (3.33)$$

$$P'''m = Pm(0) - \frac{1}{R}\frac{(\omega_o - \omega)}{2\pi f} \qquad (3.34)$$

โดยที่ Pm คือ กำลังงานกลที่ได้จากเครื่องต้นกำลัง เป็นค่าต่อหน่วย (PU)

ω_o คือ ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส $(2\pi f)$

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของเครื่องต้นกำลัง

f คือ ความถี่ของระบบ

และ $P''m = 0$ ถ้า $P'''m \leq 0$

$P''m = P'''m$ ถ้า $0 < P'''m < Pmax$

$P''m = Pmax$ ถ้า $P''' \geq Pmax$

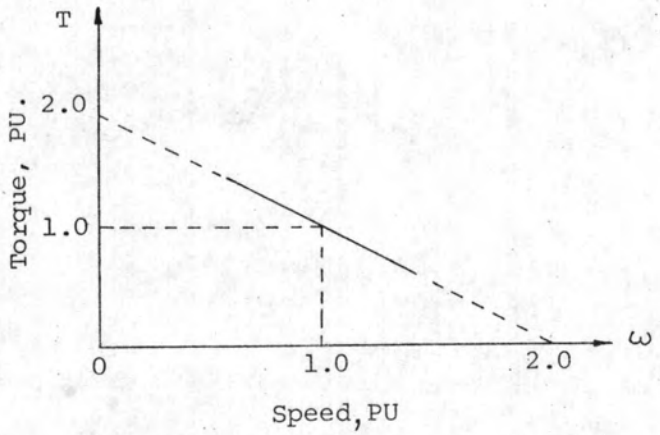
T_S = steam system time constant

T_C = control system time constant

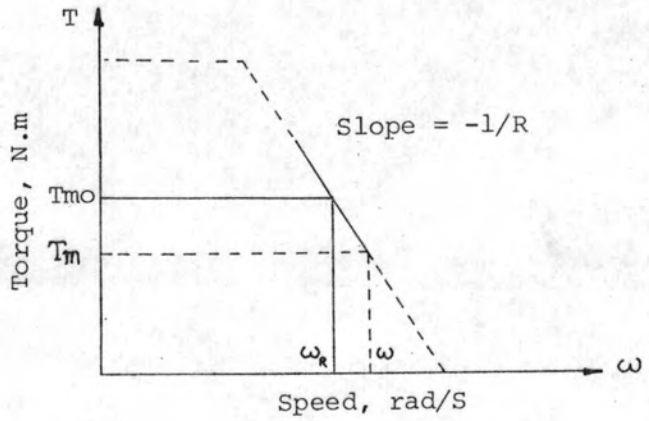
R = speed regulation in per unit $(-R_U)$

$P_m^{(0)}$ = initial mechanical power in per unit

โดยที่ $P'm$, $P''m$, $P'''m$ คือ intermediate variables

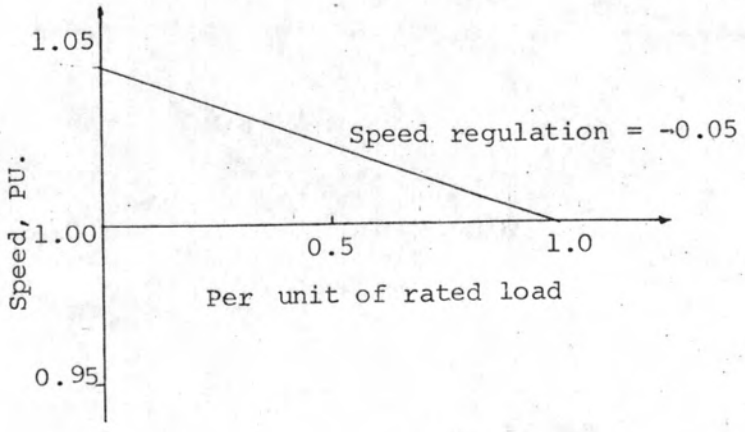


(ก) ชนิดที่ไม่มีการควบคุมความเร็วรอบ

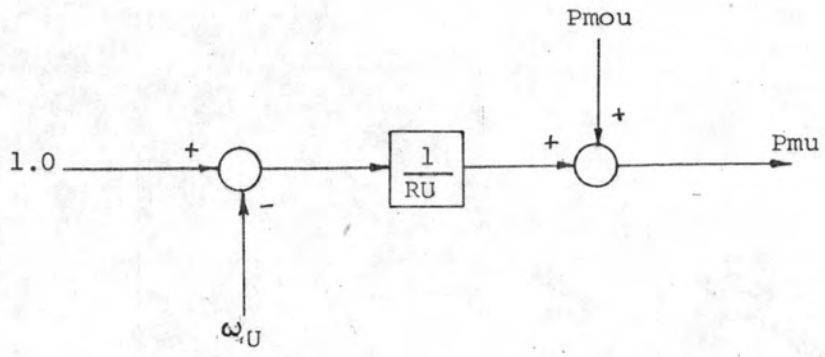


(ข) ชนิดที่มีการควบคุมความเร็วรอบ

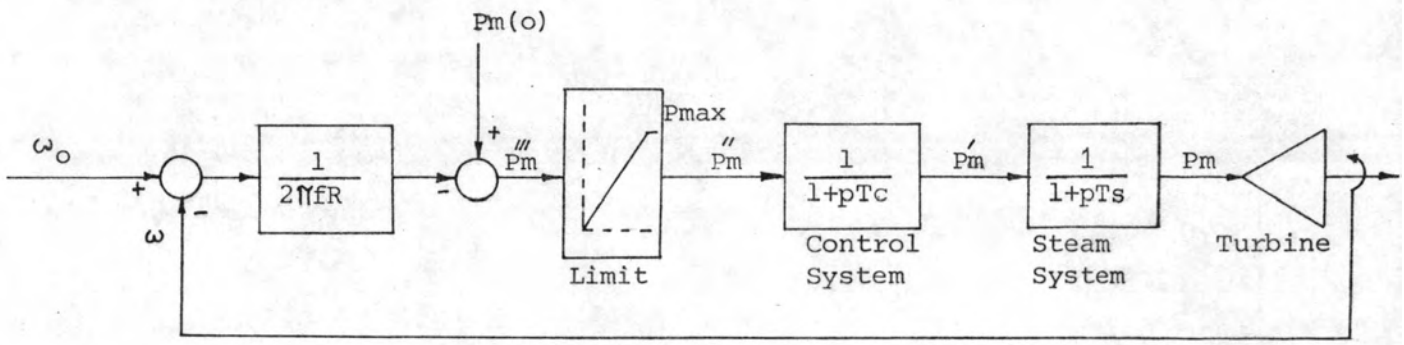
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบ



รูปที่ 3.7 คุณสมบัติของโกวเวอร์เนอร์



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและกำลังงาน (เป็นค่าต่อหน่วย)



รูปที่ 3.9 บล๊อคไดอะแกรมของระบบโกวเวอร์เนอร์

3.5 สมการสภาวะ (State Equation)

สมการสภาวะเป็นเซ็ทของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยสมการสวิง สมการของโวลเตจเรกูเลเตอร์ และสมการของโกวเวอร์เนอร์ ตามที่กล่าวมาแล้ว การหาผลลัพธ์ของสมการสภาวะทำโดยใช้วิธี Modified Euler

3.6 การแทนโหลดของระบบ[3,9]

เราอาจแทนโหลดของระบบในแต่ละบัสในสภาวะทรานเซียนต์ได้หลายชนิด ดังนี้

1) โหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่ (Constant Impedance) $P_Z + jQ_Z$

2) โหลดชนิดกระแสคงที่ ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์คงที่ (Constant Current at a Constant Power Factor) $P_I + jQ_I$

3) โหลดชนิดกำลังงานคงที่ ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์คงที่ (Constant MVA at Constant Power Factor) $P_{KVA} + jQ_{KVA}$

โดยที่การแทนโหลดชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือทั้งสามชนิดรวมกันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของโหลดที่ต่ออยู่ในระบบ

อิมพีแดนซ์ (Z_L) ที่ใช้แทนโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_L = \frac{|E_T|^2}{P_Z - jQ_Z} \tag{3.35}$$

โดยที่ E_T คือ แรงดันที่บัสของโหลด ซึ่งได้จากการคำนวณโหลดโฟลว์

$P_Z + jQ_Z$ คือ โหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่

กระแสของโหลดชนิดกระแสคงที่ (I_I) สามารถคำนวณได้จาก

$$I_I = \frac{P_I - jQ_I}{E_T^*} \tag{3.36}$$

โดยที่ $P_I + jQ_I$ คือโหลดชนิดกระแสคงที่

มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสของโหลดชนิดกระแสคงที่สามารถคำนวณได้จาก

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{Q_I}{P_I} \qquad (3.37)$$

ซึ่งขนาดของ I_I และมุมของเพาเวอร์แฟกเตอร์ (α) มีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ

กระแสของโหลดชนิดกำลังงานคงที่ (I_{KVA}) สามารถคำนวณได้จาก

$$I_{KVA} = \frac{P_{KVA} - jQ_{KVA}}{E_T^*} \qquad (3.38)$$

โดยที่ $P_{KVA} + jQ_{KVA}$ คือโหลดชนิดกำลังงานคงที่

ในช่วงของการลัดวงจรนั้นแรงดันของระบบมีระดับต่ำมาก ทำให้กระแสของโหลดชนิดกำลังคงที่มีค่าสูงมาก ลักษณะเช่นนี้ทำให้การอิเทอเรทีฟไม่สามารถหาคำตอบได้ ดังนั้นขณะลัดวงจรเราแทนโหลดทั้งหมดด้วยโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่

3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้แสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 3.10 และสามารถอธิบายได้โดยลำดับดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. อ่านข้อมูล

ขั้นตอนนี้เป็นการอ่านข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณ เช่น ข้อมูลของสายส่ง บัสโหลด และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2. คำนวณโหลดโฟลว์

แรงดันและกำลังงานก่อนเกิดความผิดปกติในระบบได้มาจากการคำนวณโหลดโฟลว์โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย[11] โดยขั้นตอนนี้ประกอบด้วย

1) การจัดข้อมูลแบ่งออกเป็นโซน
2) การสร้างเมตริกซ์ Z_1 และ Z_2
3) การสร้างเมตริกซ์ Z_4 และ Y_4
4) การกำหนดค่าเริ่มต้น

i 1792909X

5) การหาผลลัพธ์ของแรงดันโดยวิธีอิเทอเรทีฟ

6) การแสดงผลลัพธ์

ขั้นตอนที่ 3. ปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1

เมตริกซ์ Z_1 ในขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์นั้นได้จากการแทนโหลดส่วนหนึ่ง ด้วยกราวนด์-ทาย อิมพีแดนซ์ ดังนั้นในขั้นตอนนี้ต้องเอาอิมพีแดนซ์ดังกล่าวออกจากเมตริกซ์ Z_1 แล้วเพิ่มอิมพีแดนซ์ที่ใช้แทนโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่ และเนื่องจากการแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวงจรสมมูลย์นอร์ตันตามที่แสดงในรูปที่ 3.3 (ข) ดังนั้นจึงต้องเพิ่มอิมพีแดนซ์ $Z_G=0+jX_q$ ต่อลงกราวนด์ที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย

บัสที่จำเป็นต้องใช้ในการหาผลลัพธ์ของย่ายวงจรคือ บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสของโหลดชนิดกระแสคงที่ บัสของโหลดชนิดกำลังคงที่ บัสที่มีคัทลายน์ต่ออยู่ และบัสที่เกิดสัดวงจร ดังนั้นเราตัดเมตริกซ์ Z_1 เฉพาะแกนที่มีบัสดังกล่าวเพื่อเป็นการลดหน่วยความจำและลดเวลาการคำนวณลงอีก

ขั้นตอนที่ 4. คำนวณค่าเริ่มต้น

ขั้นตอนนี้ทำการคำนวณค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ก่อนเกิดความผิดปรกติเช่น ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ (δ) ขนาดของแรงดัน e'_q และกำลังงานกล (Pm(0)) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5.

ขั้นตอนนี้ตรวจสอบ ถ้าไม่มีการตัดต่อวงจร (Switching) ที่เวลา t ใด ๆ ให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 7.

ขั้นตอนที่ 6.

ถ้ามีการตัดต่อและมีสายส่งบางเส้นถูกตัดออกจากระบบ หรือต่อกลับเข้าระบบ ให้ทำการปรับปรุงเมตริกซ์ Z_1 และคำนวณเมตริกซ์ Y_4 ใหม่ จากนั้นคำนวณหาเมตริกซ์ Z_S ซึ่งประกอบด้วยสมาชิกของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของระบบรวมเฉพาะแกนของบัสที่เกิดสัดวงจร เพื่อใช้คำนวณหากระแสลัดวงจร

ขั้นตอนที่ 7. คำนวณผลลัพธ์ของย่ายวงจร

ขั้นตอนนี้ทำการอิเทอเรทีฟหาผลลัพธ์ของย่ายวงจรโดยวิธีไดอาคอปติก แล้วคำนวณกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ขั้นตอนที่ 8.

คำนวณผลลัพธ์ครั้งแรกของสมการสภาวะที่เวลา $t+\Delta t$ ด้วยวิธี Forward Euler

ขั้นตอนที่ 9.

นำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 8. มาคำนวณผลลัพธ์ของข่ายวงจรอีกครั้ง เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 7.

ขั้นตอนที่ 10.

คำนวณผลลัพธ์ครั้งสุดท้ายของสมการสภาวะที่เวลา $t+\Delta t$ ด้วยวิธี Modified Euler

ขั้นตอนที่ 11.

เพิ่มเวลาและตรวจสอบ ถ้าถึงเวลาที่กำหนดให้หยุดคำนวณแล้วแสดงผลการวิเคราะห์การอิเทอเรทีฟหาผลลัพธ์ของข่ายวงจรในขั้นตอนที่ 7. และขั้นตอนที่ 9. กระทำได้ดังนี้

ให้ I_T เป็นกระแสที่เข้าบัสใด ๆ ซึ่ง

$$I_T = I_G - I_I - I_{KVA} \qquad (3.39)$$

โดยที่ I_G คือ กระแสเข้าบัสเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 (ข)

ซึ่ง $$I_G = \frac{E_q}{jx_q}$$

I_I และ I_{KVA} คือ กระแสเนื่องจากโหลดย่นิดกระแสคงที่ และโหลดย่นิดกำลังงานคงที่ตามลำดับ ซึ่งไหลออกจากบัส

ในกรณีที่ลัดวงจรที่บัสใดบัสหนึ่งกระแสที่เข้าบัสนั้นเป็นกระแสลัดวงจร เมื่อรู้กระแสเข้าบัสแล้ว ให้หาแรงดันที่บัสต่าง ๆ โดยใช้วิธีไดอาคอปติก 6 ขั้นตอนตามที่กล่าวแล้ว

การอิเทอเรทีฟหาผลลัพธ์ได้แสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 3.11 ซึ่งแบ่งเป็น 3 วงรอบ คือ

วงรอบที่ 1. เป็นการคำนวณผลลัพธ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเริ่มจากการสมมุติค่า I_G, I_I และ I_{KVA} เป็นค่าเริ่มต้น คำนวณแรงดันที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยวิธีไดอาคอปติก แล้วคำนวณกระแสที่ยั่ว I_t จากสมการ (3.1) และขนาดแรงดัน e'_q จาก

สมการ (3.5) จากนั้นเปรียบเทียบ $|e'_q|$ ที่ได้กับ $|\bar{e}'_q|$ ที่เวลานั้น ๆ ถ้ายังไม่ได้ค่าที่ตรงกันให้ทำการปรับปรุงขนาดแรงดัน E_q โดยที่

$$|E_q| = |E_q|^{old} \frac{|\bar{e}'_q|}{|e_q|}$$

แล้วกลับไปอิเทอเรทีฟครั้งต่อไปจนกว่าจะได้คำตอบ เสร็จแล้วไปทำในวงรอบที่ 2

วงรอบที่ 2. เป็นการคำนวณผลสัพธ์ของโหลดย่นิดกระแสคงที่ ในวงรอบนี้ I_G และ I_{KVA} คงที่ตามค่าที่ได้จากวงรอบที่ 1. และขนาดของ I_I คงที่ตามค่าเริ่มต้นแต่เฟสเปลี่ยนแปลง

ถ้าให้ $I_I = |I_I| \angle \theta - \alpha$

โดยที่ α คือ มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสของโหลด ซึ่งมีค่าคงที่ตามค่าเริ่มต้น

θ คือ เฟสของของแรงดันของโหลดย่นิดกระแสคงที่

คำนวณเฟสของแรงดันของโหลด ($\bar{\theta}$) โดยวิธีไดอาคอปติก จากนั้นเปรียบเทียบ $|\bar{\theta}|$ และ $|\theta|$ ถ้ายังไม่ได้ค่าที่ตรงกันให้ทำการปรับปรุงเฟสของ I_I โดยที่

$$\theta = \bar{\theta}$$

แล้วกลับไปอิเทอเรทีฟครั้งต่อไปจนได้คำตอบ แล้วไปทำในวงรอบที่ 3.

วงรอบที่ 3. เป็นการคำนวณผลสัพธ์ของโหลดย่นิดกำลังงานคงที่ ในวงรอบนี้กระแส I_G และ I_I คงที่ตามค่าที่ได้จากวงรอบที่ 1. และวงรอบที่ 2. โดยที่กระแส I_{KVA} เป็นตัวแปร คำนวณแรงดันที่บัสของโหลด (E_{KVA}) แล้วคำนวณกระแส $\bar{I}_{KVA}$ จากสมการ

$$\bar{I}_{KVA} = \frac{(P_{KVA} - jQ_{KVA})}{E^*_{KVA}}$$

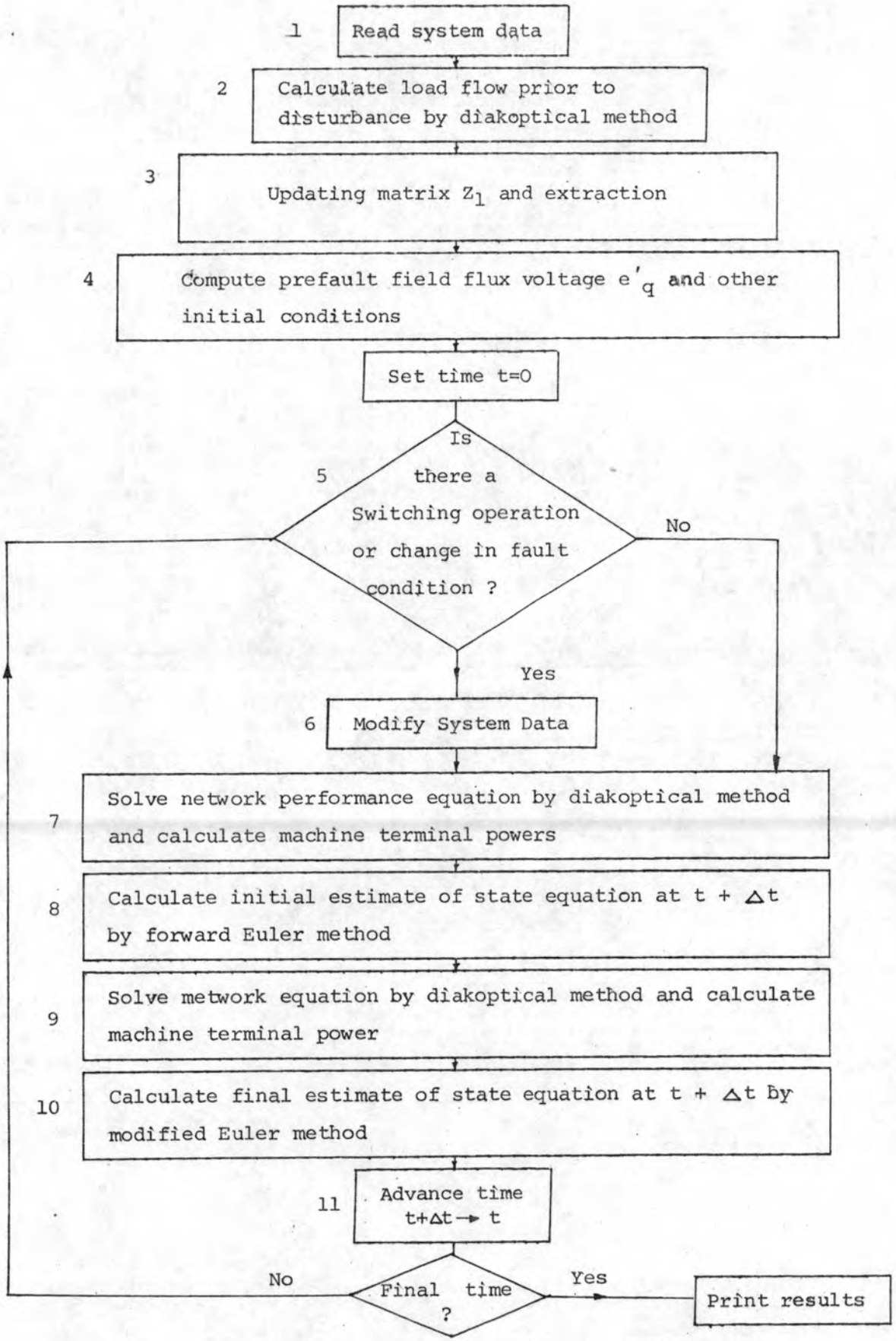
จากนั้นเปรียบเทียบ $\bar{I}_{KVA}$ กับ I_{KVA} ถ้ายังไม่ใช่คำตอบให้ทำการปรับปรุงกระแส I_{KVA} โดยที่

$$I_{KVA} = \bar{I}_{KVA}$$

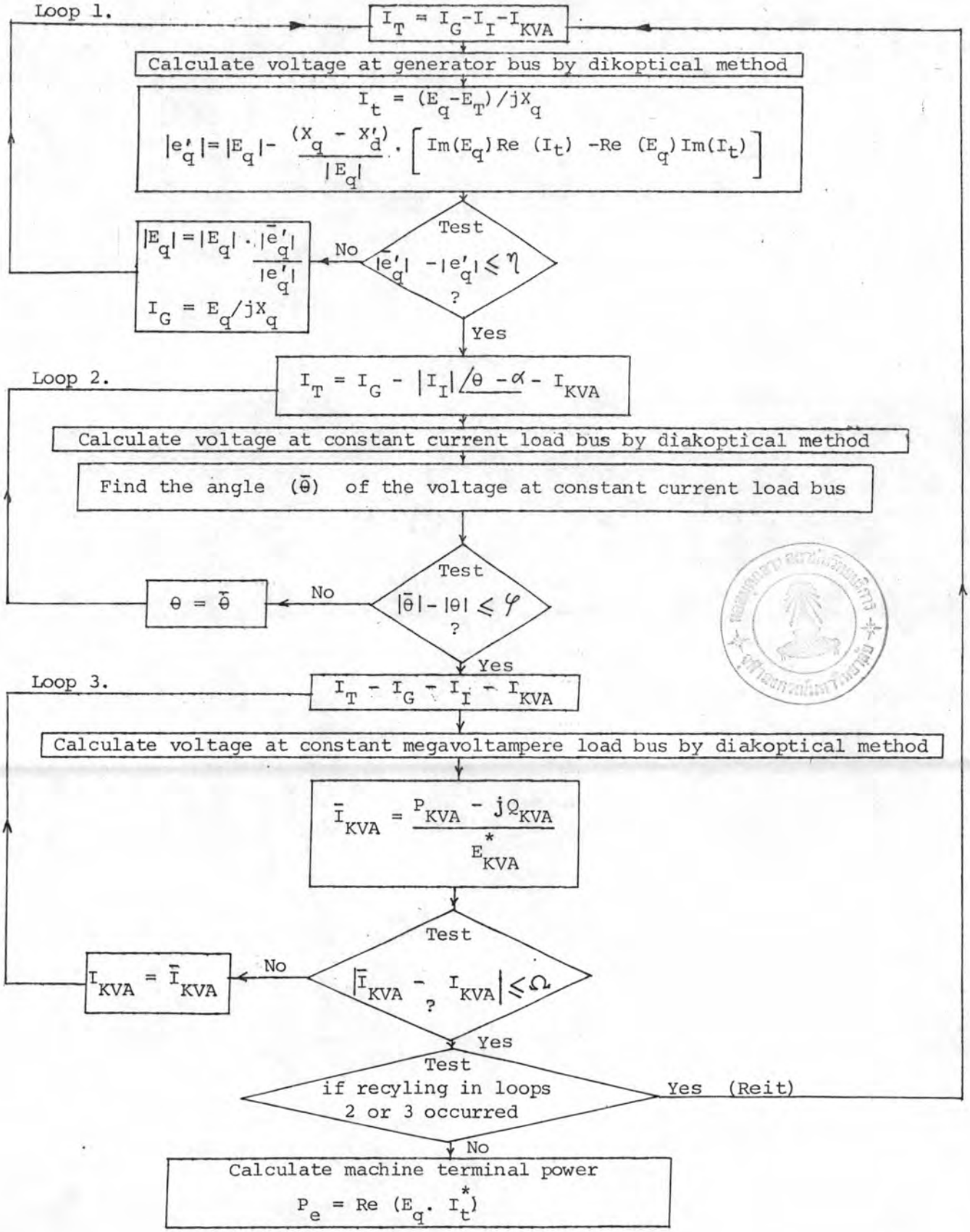
แล้วกลับไปอิเทอเรทีฟครั้งต่อไปจนได้คำตอบ แล้วตรวจสอบถ้ามีการอิเทอเรทีฟในวงรอบที่ 2. และวงรอบที่ 3. ให้กลับไปเริ่มอิเทอเรทีฟตั้งแต่วงรอบที่ 1. ใหม่จนกว่าไม่มีการอิเทอเรทีฟ ซึ่งแสดงว่าค่า I_G, I_I และ I_{KVA} ที่ได้คือค่าที่ทำให้ได้ผลสัพธ์ของย่าย-วงจรตามต้องการ จากนั้นคำนวณกำลังงานที่ยั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังนี้

$$Pe = Re\left[E_q . I_t^*\right] \qquad (3.39)$$

โดยที่ Pe คือ กำลังงานที่ยั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 โฟลว์ชาร์ตการหาเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 3.11 โฟลว์ชาร์ตการอิเทอเรทีพหาผลลัพธ์