

บทที่ 4

แบบจำลองระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยระบบที่สำคัญๆ ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้า (Generation System) ระบบส่งไฟฟ้า (Transmission System) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) นอกจากนี้ยังรวมไปถึงโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า ระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System) ด้วย ซึ่งอาจจะมีรูปแบบเป็นผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อย (SPP) หรือผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (IPP) ก็ได้ โดยมีมาตรการซื้อขายไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าหลักด้วย ในการจำลองพฤติกรรมชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง จำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นมา และนำไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยอุปกรณ์หลักที่จะกล่าวถึงต่อไป ประกอบไปด้วย แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Machine Model) แบบจำลองระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter Model) แบบจำลองระบบควบคุมความเร็ว (Governor Model) และแบบจำลองภาระทางไฟฟ้า (Load Model) นอกจากนี้ การที่จะศึกษาพฤติกรรมของระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System) จึงจำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมขึ้นมาด้วย ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับประเภทของระบบผลิตพลังงานร่วมที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 โดยพิจารณาคุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละส่วนพร้อมๆ กันไป ต่อไปจะได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ โดยละเอียด ดังนี้

4.1 แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Machine Model) [13]

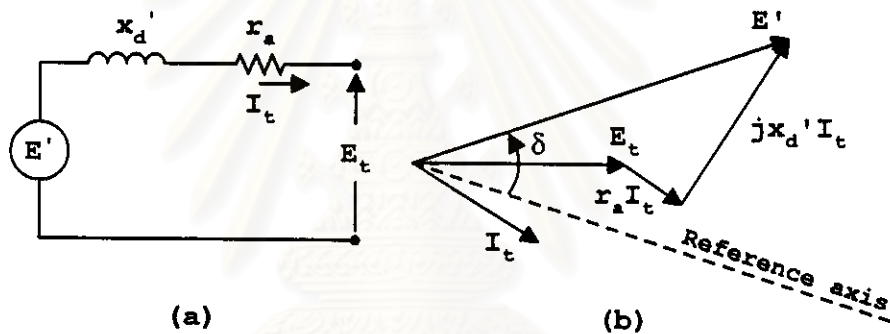
แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส สำหรับการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability Analysis) ในที่นี้จะทำการแบ่งแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

- 1). แบบจำลองอย่างง่าย (Classical Model)
- 2). แบบจำลองที่คิดผลของขั้วยื่นเด่น และการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (Saliency and Changes in field flux linkages)

โดยรายละเอียดของการคิดแบบจำลองทั้ง 2 แบบ มีดังต่อไปนี้

4.1.1 แบบจำลองอย่างง่าย (Classical Model) [13,14,18]

ในการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพชั่วคราว ที่เป็นการวิเคราะห์ในช่วงเวลาสั้นๆ (Short Period) ซึ่งอาจจะเป็นช่วงวินาที หรือน้อยกว่านั้น ในกรณีเช่นนี้เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถที่จะแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันหลังค่าทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ (Transient Reactance) ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันนี้ จะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่มีขนาดคงที่ แต่มุมเฟสมีการเปลี่ยนแปลงได้ การแทนด้วยแบบจำลองเช่นนี้ ได้จากการตัดผลของลักษณะขั้วยื่นเด่น (Saliency) ออก และสมมติให้สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ที่ความถี่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสอย่างง่าย พร้อมด้วยลักษณะของเฟสเซอร์ไดอะแกรม (Phasor Diagram) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ถ้าจะกล่าวถึงเงื่อนไขการใช้แบบจำลองนี้จริงๆ แล้ว ต้องเป็นไปตามลักษณะดังนี้



รูปที่ 4.1 แบบจำลองอย่างง่ายของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

(a) วงจรสมมูล (b) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

- 1). ในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient) กำลังงานกลที่ป้อนเข้าตัวขับเคลื่อน (Prime Mover; P_m) มีค่าคงที่
- 2). ต้องไม่คิดผลของการหน่วง (Damping)
- 3). เขียนแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าคงที่ (E') ซึ่งจ่ายแรงดันผ่านค่าทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ (Transient Reactance; X_d') ไปยังขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4). มุมของตัวโรเตอร์ (Rotor Angle) สมนัยกับมุมทางไฟฟ้า (δ) ของแหล่งจ่ายแรงดัน
- 5). ภาระทางไฟฟ้าของระบบที่ต่อกับขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถที่จะแทนได้ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) คงที่ที่ต่อระหว่างขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับสายศูนย์ (Neutral)

การใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าข้างต้น สามารถนำมาเขียนแทนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.1)

$$E' = E_t + r_a I_t + jX_d' I_t \quad (4.1)$$

เมื่อ E' = แรงดันหลังค่าทรานเซียนตรีแอคแตนซ์ (Voltage Back of Transient Reactance)

E_t = แรงดันที่ขั้วของเครื่องจักร (Machine Terminal Voltage)

I_t = กระแสที่ขั้วของเครื่องจักร (Machine Terminal Current)

r_a = ความต้านทานของเครื่องจักร (Armature Resistance)

X_d' = ค่าทรานเซียนตรีแอคแตนซ์ (Transient Reactance)

ซึ่งสมการแบบจำลองนี้จะได้มีการนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวสำหรับระบบไฟฟ้าต่อไป

4.1.2 แบบจำลองที่คิดผลของขั้วยื่นเด่น และการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (Saliency and Changes in field flux linkages) [13]

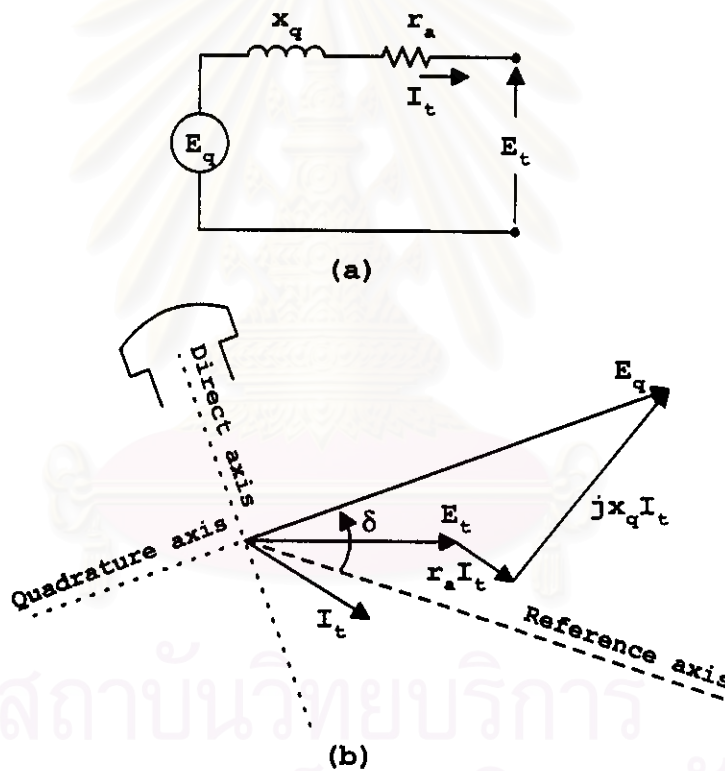
เนื่องจากในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าที่มีความต้องการความถูกต้องของผลตอบสนองที่ใกล้เคียงความจริงที่สุด คือ มีการรวมผลของลักษณะทางกายภาพของขั้วสร้างสนาม (Saliency Pole) และการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก นอกจากนั้นยังต้องมีการคิดผลของระบบควบคุมต่างๆ (Exciter & Governor) เข้ามาด้วย จึงเป็นไปได้ที่จะนำแบบจำลองอย่างง่ายมาคิด การใช้แบบจำลองที่ละเอียดขึ้นจึงได้เข้ามาแทนที่

ผลของลักษณะขั้วยื่นเด่น (Saliency) และการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก สามารถที่จะนำมาคิดได้โดยการแสดงผลของปริมาณต่างๆ ในระบบกระแสลับตามเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ด้วยส่วนประกอบที่แยกออกเป็นแกนตรง (Direct Axis) และแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) แกนตรงจะอยู่ในแนวของกึ่งกลางขั้วของเครื่องจักร ในขณะที่แกนตั้งฉากจะมีมุมนำหน้าแกนตรงอยู่ 90 องศาทางไฟฟ้า ตำแหน่งของแกนตั้งฉากสามารถพิจารณาได้จากการคำนวณค่าแรงดันสมมติที่อยู่ในแนวแกนนี้ ซึ่งก็คือ แรงดันหลังค่าซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแกนตั้งฉาก (Voltage Back of Quadrature Axis Synchronous Reactance) นั่นเอง พิจารณาได้จากสมการที่ (4.2)

$$E_q = E_t + r_a I_t + jX_q I_t \quad (4.2)$$

- เมื่อ E_q = แรงดันหลังขึงโครน์สตรีแอกแตนซีในแกนตั้งฉาก
(Voltage Back of Quadrature Axis Synchronous Reactance)
- X_q = ขึงโครน์สตรีแอกแตนซีในแกนตั้งฉาก
(Quadrature Axis Synchronous Reactance)

แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าขึงโครน์สตรีแอกแตนซีที่ใช้สำหรับหามลเฉลยของวงจรเครือข่าย (Network Solution) และเฟสเซอร์ไดอะแกรม (Phasor Diagram) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าขึงโครน์สตรีแอกแตนซีสำหรับการคิด E_q

(a) วงจรสมมูล (b) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

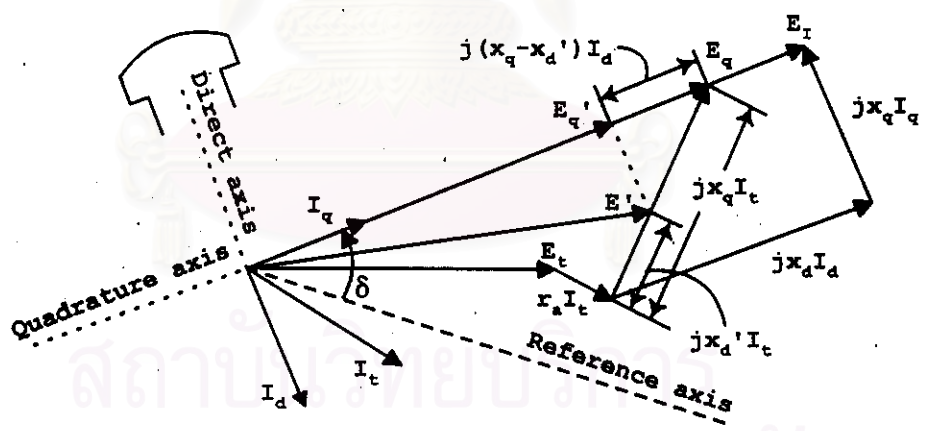
เส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเป็นฟังก์ชันของชายน์ (Sinusoidal Flux) ได้สร้างมาจากกระแสสนาม (Field Current) ที่ส่งผลในแกนตรง (Direct Axis) แรงดันเหนี่ยวนำซึ่งเกิดจากกระแสสนามนี้จะมีมุมเฟสที่ตามหลังอยู่ 90 องศา ทำให้มีตำแหน่งตรงกับแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) พอดี โดยค่าแรงดันนี้สามารถหาได้จากการรวมค่าของแรงดันที่ขั้ว (E) กับค่าของแรงดันที่ตกคร่อมความ

ต้านทานของเครื่องจักร (Armature Resistance) และแรงดันที่ตกคร่อมจากผลของสนามแม่เหล็ก ในแกนตรง (Direct Axis) และแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) โดยไม่คิดผลของการอิ่มตัว จะได้สมการที่ (4.3)

$$E_t = E_f + r_a I_t + jX_d I_d + jX_q I_q \tag{4.3}$$

- เมื่อ E_f = แรงดันเนื่องจากกระแสสนาม (Voltage Proportional to Field Current)
- X_d = ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแกนตรง (Direct Axis Synchronous Reactance)
- X_q = ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ในแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis Synchronous Reactance)
- I_d = องค์ประกอบในแกนตรงของการเสี้ยวของเครื่องจักร
- I_q = องค์ประกอบในแกนตั้งฉากของการเสี้ยวของเครื่องจักร

เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดง E_t ในลักษณะของแรงดันหลังทรานเซียนตริแอคแตนซ์ ดังในรูปที่ 4.3 องค์ประกอบในแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) ของแรงดันหลังทรานเซียนตริแอคแตนซ์ จากเฟสเซอร์ไดอะแกรม คือ



รูปที่ 4.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับการพิจารณาองค์ประกอบในแกนตั้งฉากของแรงดันหลังค่าทรานเซียนตริแอคแตนซ์

$$E_q' = E_q - j(X_q - X_d') I_d \tag{4.4}$$

เมื่อ E_q' คือ แรงดันที่แปรตามเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นผลมาจากการรวมผลของสนามและกระแสอาร์มาเจอร์ (Armature Current) เนื่องจากเส้นแรงสนามเกี่ยวคดต้องไม่สามารถเปลี่ยนแปลง

แปลงทันทีทันใดที่เกิดการรบกวนขึ้นได้ ดังนั้น E_q' จึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดได้เช่นกัน อัตราการเปลี่ยนแปลงของ E_q' ตามแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) ขึ้นอยู่กับการควบคุมแรงดัน กระตุ้นสนาม โดยตัวควบคุม (Regulator) และระบบกระตุ้นสนาม (Exciter) รวมทั้งขึ้นกับแรงดันที่แปรตามกระแสสนาม และค่าเวลาคงที่ของการเปิดวงจรถวายเทียนตีในแกนตรง (Direct Axis Transient Open Circuit Time Constant) ตามสมการที่ (4.5)

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{\tau_{do}} (E_{FD} - E_q') \quad (4.5)$$

เมื่อ E_{FD} = แรงดันสนามที่กระทำในแนวแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis)
 τ_{do}' = ค่าคงที่ของเวลาการเปิดวงจรถวายเทียนตีในแนวแกนตรง
 (Direct Axis Transient Open Circuit Time Constant)

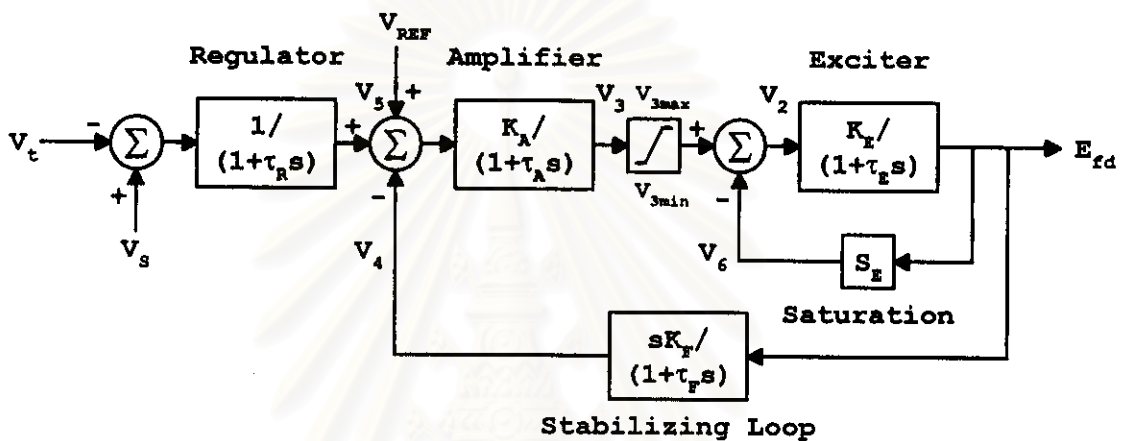
จากที่กล่าวมานี้ ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ทั้งแบบจำลองอย่างง่าย และแบบจำลองที่มีความละเอียดขึ้น เวลาที่คิดผลของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ จำเป็นต้องนำแบบจำลองที่ละเอียดมาใช้ในการวิเคราะห์ เพราะสามารถเชื่อมโยงแบบจำลองถึงกันได้นั่นเอง ส่วนอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ มีลักษณะและที่ใช้อย่างไร ก็จะได้กล่าวถึงในลำดับต่อไป

4.2 แบบจำลองระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter Model) [9,13-16]

จากแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส เมื่อมีการคิดผลของระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) จะทำการพิจารณาที่แรงดันสนาม (E_{FD}) ดังสมการที่ (4.5) โดยผลตอบสนองที่พิจารณาจะเกิดขึ้นในช่วงที่เกินจากหนึ่งวินาทีขึ้นไป

ระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) จะทำหน้าที่ในการปรับขนาดแรงดันสนาม (Field Voltage) เพื่อให้แรงดันของระบบมีค่าตามต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับบัลด์ที่มีแรงดันสูงๆ ในโรงจักรไฟฟ้า คุณสมบัติที่สำคัญของระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ทั้งในระหว่างการทำงานปกติและในสภาวะฉุกเฉิน ระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง มีอยู่หลายชนิด ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) ได้แก่ ระบบควบคุม (Regulator)

ระบบขยาย (Amplifier) และระบบกระตุ้นสนาม (Exciter) โดยระบบควบคุม (Regulator) จะเป็นตัววัดค่าการควบคุมแรงดันจริง ๆ และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน สัญญาณของการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากระบบควบคุม (Regulator) จะได้รับการขยายสัญญาณให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสนาม (Exciter Field Current) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแรงดันขาออกของระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter Output Voltage) ซึ่งเป็นผลของการกระตุ้นสนามระดับใหม่สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการกระตุ้นสนามแบบต่อเนื่อง
(Continuously Acting Exciter Control System) [13]

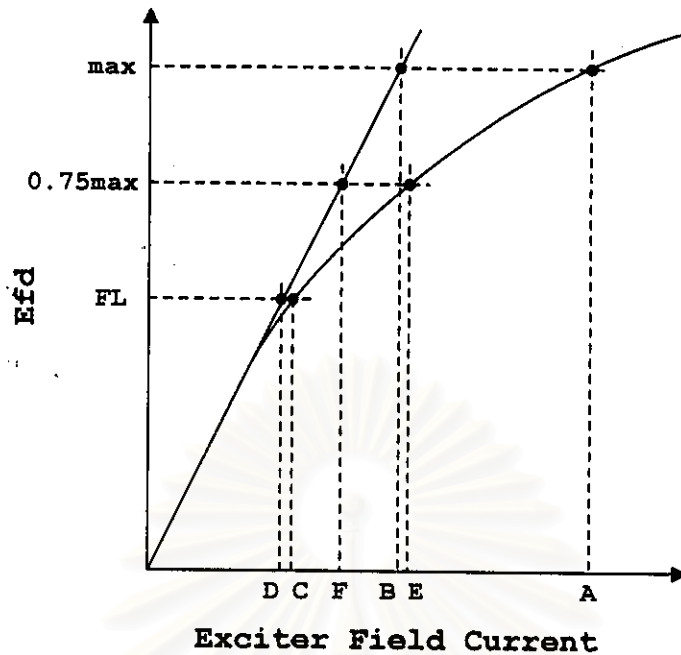
การแสดงระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) วิธีที่สะดวก คือ การแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ที่แสดงความสัมพันธ์ผ่านทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน (Transfer Function) มีตัวแปรเข้าและตัวแปรออกตามส่วนประกอบหลักๆ ของระบบควบคุม บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการกระตุ้นสนามที่ได้เลือกใช้ แสดงด้วยระบบควบคุมการกระตุ้นสนามแบบต่อเนื่อง (Continuously Acting Exciter Control System) ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบไปด้วย ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่อธิบายในส่วนของระบบควบคุม (Regulator) ระบบขยาย (Amplifier) ระบบกระตุ้นสนาม (Exciter) และส่วนของวงรอบการปรับปรุงเสถียรภาพ (Stabilizing Loop) โดยส่วนของวงรอบการปรับปรุงเสถียรภาพ (Stabilizing Loop) นี้ จะเป็นตัวปรับปรุงผลตอบสนอง มีการกำจัดส่วนของการสั่นที่ไม่ต้องการและการพุ่ง (Overshoot) ของแรงดันควบคุมออกไป สมการอนุพันธ์ที่สัมพันธ์กับตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของระบบควบคุม (Regulator) ระบบขยาย (Amplifier) ระบบกระตุ้นสนาม (Exciter) และวงรอบการปรับปรุงเสถียรภาพ (Stabilizing Loop) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{dV_s}{dt} &= \frac{1}{\tau_R} (V_s - V_t - V_s) \\
\frac{dV_3}{dt} &= \frac{1}{\tau_A} [K_A (V_s + V_{REF} - V_4) - V_3] \\
V_{3min} &\leq V_3 \leq V_{3max} \\
V_6 &= S_E E_{fd} \\
V_2 &= V_3 - V_6 \\
\frac{dE_{fd}}{dt} &= \frac{1}{\tau_E} (V_2 - K_E E_{fd}) \\
\frac{dV_4}{dt} &= \frac{1}{\tau_F} \left(K_F \frac{dE_{fd}}{dt} - V_4 \right)
\end{aligned} \tag{4.6}$$

- เมื่อ
- V_s = แรงดันบัลต์ที่ได้จากตาราง (Load Flow Solution)
 - V_{REF} = ระดับแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)
 - τ_R = ค่าคงที่เวลาของระบบควบคุม (Regulator Time Constant)
 - K_A = ค่ากำลังขยายของระบบขยาย (Amplifier Gain)
 - τ_A = ค่าคงที่เวลาของระบบขยาย (Amplifier Time Constant)
 - K_E = ค่ากำลังขยายของระบบกระตุ้นสนาม (Exciter Gain)
 - τ_E = ค่าคงที่เวลาของระบบกระตุ้นสนาม (Exciter Time Constant)
 - K_F = ค่ากำลังขยายของวงรอบการปรับปรุงเสถียรภาพ (Stabilizing Loop Gain)
 - τ_F = ค่าคงที่เวลาของวงรอบการปรับปรุงเสถียรภาพ (Stabilizing Loop Time Constant)
 - S_E = ฟังก์ชันการอิ่มตัวของระบบกระตุ้นสนาม (Exciter Saturation Function)

โดยค่าของ S_E กำหนดได้โดยใช้กราฟแบบจำลองเอ็กโพเนนเชียล (Exponential Model Curve) [15] ซึ่งใกล้เคียงกับกราฟการอิ่มตัวของระบบกระตุ้นสนามจริงๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สามารถกำหนดค่า S_E ที่ตำแหน่งสูงสุด (max) 75%(0.75max) และที่ระดับภาระเต็มที่ (Full Load) ได้ดังต่อไปนี้

$$S_{E_{max}} = \frac{(A-B)}{B}; \quad S_{E_{.75}} = \frac{(E-F)}{F}; \quad S_{E_{FL}} = \frac{(C-D)}{D} \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.5 กราฟแบบจำลองการอิ่มตัวของระบบกระตุ้นสนาม
(Exciter Saturation Curve)

ในลักษณะของค่าต่อหน่วย (Per-unit) โดยใช้ $E_{FD\text{FL}}$ เป็นค่าฐาน (Base) จะได้

$$E_{FD\text{max}} = \frac{E_{FD\text{max}}(V)}{E_{FD\text{FL}}(V)} = \frac{B}{D} \quad \text{p.u.}$$

หรือ $B = DE_{FD\text{max}}$ (4.8)

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณ

$$\frac{B}{F} = \frac{4}{3} = \frac{DE_{FD\text{max}}}{F}$$

หรือ $F = 0.75DE_{FD\text{max}}$ (4.9)

จากสมการ (4.7)-(4.9) สามารถเขียนได้ว่า

$$S_{E\text{max}} = \frac{(A-B)}{B} = \frac{(A-B)}{DE_{FD\text{max}}}$$

$$S_{E.75\max} = \frac{(E-F)}{F} = \frac{(E-F)}{0.75DE_{FD\max}} = \left(\frac{4}{3}\right) \frac{(E-F)}{DE_{FD\max}} \quad (4.10)$$

จากนี้จะกำหนดฟังก์ชันการอิมิตัวโดย

$$S_E = A_{EX} e^{B_{EX} E_{FD}} \quad (4.11)$$

ซึ่งเป็นการให้ค่าโดยประมาณของการอิมิตัวที่ระดับของ E_{FD} ต่างๆ กัน โดยค่าที่ใช้หาการอิมิตัวจะใช้ที่ $E_{FD\max}$ และ $0.75E_{FD\max}$ จะได้ค่าของ $S_{E\max}$ และ $S_{E.75\max}$ ออกมาตามลำดับ ใช้ค่าการอิมิตัวสองค่าที่ได้นี้ เราสามารถคำนวณตัวไม่รู้ค่า A_{EX} และ B_{EX} ได้ ที่ $E_{FD} = E_{FD\max}$

$$S_E = S_{E\max} = \frac{(A-B)}{DE_{FD\max}} = A_{EX} e^{B_{EX} E_{FD\max}} \quad (4.12)$$

และที่ $E_{FD} = 0.75E_{FD\max}$

$$S_E = S_{E.75\max} = \left(\frac{4}{3}\right) \frac{(E-F)}{DE_{FD\max}} = A_{EX} e^{B_{EX} (0.75E_{FD\max})} \quad (4.13)$$

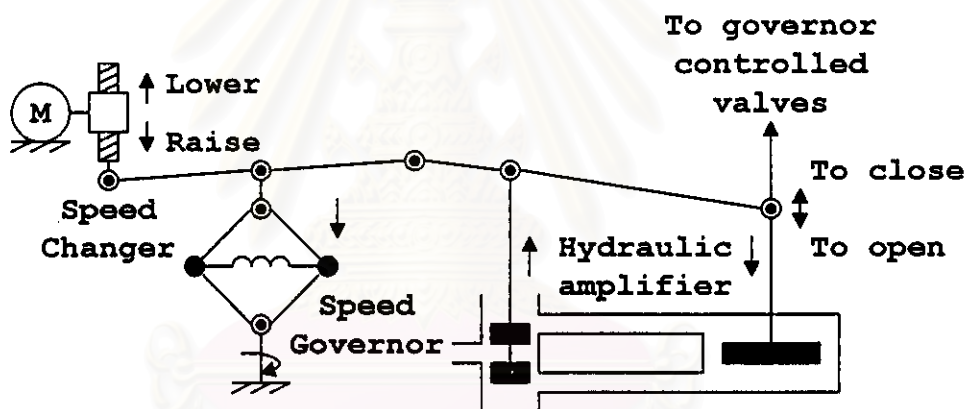
จากการแก้สมการ (4.12) และ (4.13) จะได้

$$A_{EX} = \frac{S_{E.75\max}^4}{S_{E\max}^3}; \quad B_{EX} = \left(\frac{4}{E_{FD\max}}\right) \ln\left(\frac{S_{E\max}}{S_{E.75\max}}\right) \quad (4.14)$$

การใช้แบบจำลองของระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter Model) เป็นการแก้สมการอนุพันธ์ (4.6) ไปพร้อมๆ กับสมการการแกว่งของเครื่องจักรไฟฟ้า (Swing Equation) ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับระบบที่ใช้งานจริงมากขึ้น ผลโดยตรงที่เห็นได้ชัดเจนก็คือ ระดับแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบสามารถมีการทำงานอย่างปกติในเวลาอันรวดเร็ว หลังจากที่เกิดการรบกวนระบบขึ้น เป็นการช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบได้อีกทางหนึ่ง

4.3 แบบจำลองระบบควบคุมความเร็ว (Governor Model) [13-16]

เมื่อภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่ากำลังป้อนเข้าทางกล (Mechanical Power Input) กำลังไฟฟ้าที่ขาดแคลนนี้จะได้รับการจ่ายโดยพลังงานจลน์ที่สะสมในระบบการหมุน (Rotating System) การลดลงของพลังงานจลน์เป็นสาเหตุให้ความเร็วของกังหัน (Turbine Speed) และความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงของความเร็วนี้จะถูกตรวจจับได้โดยระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการปรับวาล์วเข้ากังหัน (Turbine Input Valve) เพื่อเปลี่ยนระดับกำลังทางกลที่ป้อนเข้า ทำให้ความเร็วมีค่าอยู่ในสภาวะคงตัวใหม่ ส่วนประกอบหลัก ๆ ของระบบควบคุมความเร็ว [14] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 แต่ละส่วนมีความสำคัญดังนี้



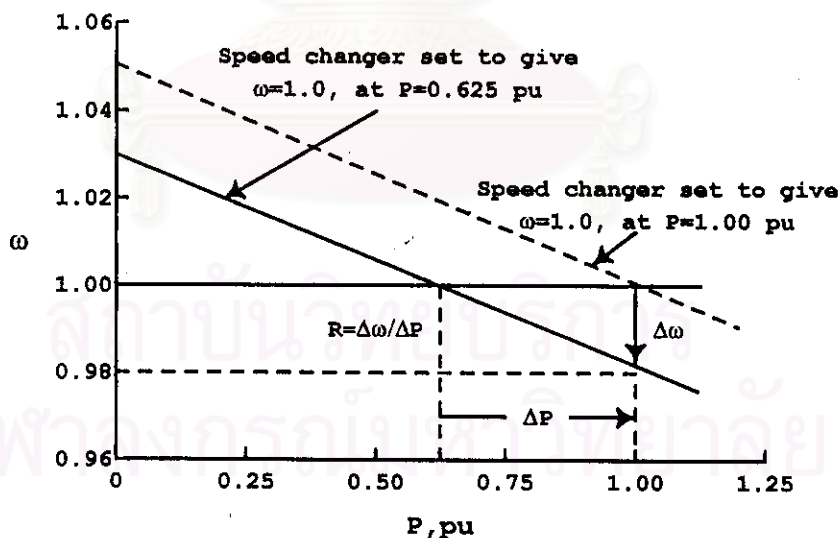
รูปที่ 6 ระบบควบคุมความเร็ว (Speed Governor System)

- 1) Speed Governor: เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของกังหัน (Turbine) สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโดยการขยับกลไกขึ้นลงตามระดับความเร็วที่เปลี่ยนไป
- 2) Linkage Mechanism: เป็นจุดเชื่อมในการส่งสัญญาณควบคุมต่าง ๆ
- 3) Hydraulic Amplifier: เป็นแรงทางกลที่ใช้ในการทำงานของวาล์วไอน้ำ (Steam Valve) ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ก็จะได้รับขยายด้วยแรงที่สูงขึ้น

4) Speed Changer: ตัวปรับความเร็ว ประกอบไปด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (Servomotor) ซึ่งสามารถสั่งงานจากผู้ควบคุมหรือ แบบอัตโนมัติ เป็นการปรับความเร็วให้เหมาะสมกับภาระที่เปลี่ยนแปลงในช่วงวัน ทำให้ความถี่ของระบบอยู่ในระดับใช้งานปกติตลอดเวลา

ส่วนประกอบที่เพิ่มเติมนอกเหนือจากนี้ก็จะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ให้เหมาะสมกับโรงจักรไฟฟ้าแต่ละโรงไป ในการทำงานที่มีเสถียรภาพ ระบบควบคุมความเร็วจะได้รับการออกแบบให้สามารถยอมรับความเร็วที่ลดลงได้ จากระดับภาระที่มีค่าเพิ่มขึ้น คุณสมบัติในสภาวะคงตัวของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

ความชันของเส้นกราฟจะแสดงถึงการควบคุมความเร็ว (Speed Droop; R) ระบบควบคุมความเร็วทั่วๆ ไปจะมีค่าการควบคุมความเร็ว (R) ประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ จากศูนย์ถึงระดับภาระเต็มที่ (Full Load) การทำงานของตัวควบคุมความเร็วจะเป็นลักษณะของตัวเปรียบเทียบให้กำลังผลิตที่เปลี่ยนแปลง (ΔP_G) จากความแตกต่างของกำลังอ้างอิง (ΔP_{REF}) กับกำลังที่ได้จากตัวควบคุมความเร็ว ($\Delta \omega/R$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.15)

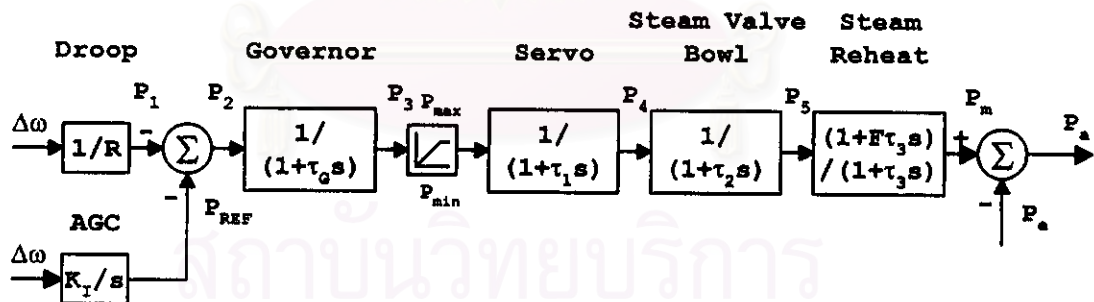


รูปที่ 4.7 คุณสมบัติในสภาวะคงตัวของระบบควบคุมความเร็ว

$$\Delta P_G = \Delta P_{REF} - \frac{1}{R} \Delta \omega \quad (4.15)$$

ปัญหาของการใช้ระบบควบคุมความเร็วแบบทั่วไป ถ้าภาระของระบบมีการเพิ่มขึ้น ความเร็วของกังหัน (Turbine) จะลดลงก่อนที่ระบบควบคุมความเร็วจะสามารถปรับการจ่ายเข้าของไอน้ำให้เหมาะสมกับภาระค่าใหม่ได้ การปรับวาล์วสำหรับความเร็วที่ลดลงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง และตำแหน่งของตัวปรับความเร็วจะเข้าใกล้ตำแหน่งที่ต้องการในการรักษาระดับความเร็วให้คงที่ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วที่คงที่นี้จะไม่สามารถกลับมาอยู่ที่ค่าที่กำหนดไว้ได้ จะเกิดเป็นผลต่างค่าหนึ่ง วิธีที่จะทำให้ความเร็วหรือความถี่กลับมาที่ค่าที่กำหนดได้นั้นคือ การเพิ่มตัวอินทิเกรเตอร์ (Integrator) เข้าไป [14,16,17] ตัวอินทิเกรเตอร์นี้จะเป็นตัวสังเกตความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตลอดช่วงเวลา และทำการแก้ปัญหาคความคลาดเคลื่อนนั้น ดังนั้นเมื่อภาระของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง กำลังผลิตก็จะถูกปรับอย่างอัตโนมัติเพื่อให้ความถี่ของระบบสามารถกลับมาเป็นค่าเดิมได้ วิธีที่ใช้อยู่นี้เป็นที่รู้จักกันก็คือ การควบคุมกำลังผลิตแบบอัตโนมัติ (Automatic Generation Control, AGC) นั่นเอง

การศึกษาผลของระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient) สามารถใช้แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ได้ จากรูปได้แสดงให้เห็นถึงทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญของระบบควบคุมความเร็วเอาไว้ ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการอนุพันธ์ ดังนี้



รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็ว

(Speed Governor Model) [13-15]

$$P_1 = \frac{1}{R} \Delta\omega$$

$$\frac{dP_{REF}}{dt} = K_I \Delta\omega$$

$$P_2 = -P_{REF} - P_1$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_3}{dt} &= \frac{P_2}{\tau_G} - \frac{P_3}{\tau_G} \\
 P_{\min} &\leq P_3 \leq P_{\max} \\
 \frac{dP_4}{dt} &= \frac{P_3}{\tau_1} - \frac{P_4}{\tau_1} \\
 \frac{dP_5}{dt} &= \frac{P_4}{\tau_2} - \frac{P_5}{\tau_2} \\
 \frac{dP_m}{dt} &= \frac{P_5}{\tau_3} - \frac{P_m}{\tau_3} + F \frac{dP_5}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

- เมื่อ
- P_m = กำลังทางกล (Mechanical Power)
 - P_{REF} = กำลังอ้างอิง (Reference Power)
 - P_2, P_3, P_4, P_5 = ผลต่างของกำลังที่ใช้ในการควบคุมความเร็ว (Intermediate Variables)
 - R = ค่าการควบคุมความเร็ว (Speed Droop)
 - K_I = ค่ากำลังขยายของอินทิเกรเตอร์ในระบบ AGC (Integral Controller Gain)
 - τ_G = ค่าคงที่เวลาของระบบควบคุมความเร็ว (Governor Time Constant)
 - τ_1 = ค่าคงที่เวลาของเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Time Constant)
 - τ_2 = ค่าคงที่เวลาของวาล์วไอน้ำ (Steam Valve Bowl Time Constant)
 - τ_3 = ค่าคงที่เวลาของการทำให้ไอน้ำร้อน (Steam reheat Time Constant)
 - F = ค่าต่อหน่วยกำลังของเพลลา (Per-unit Shaft Output Ahead of Reheater)

การใช้แบบจำลองของระบบควบคุมความเร็ว (Governor Model) ก็เป็นการแก้สมการอนุพันธ์เช่นเดียวกับระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) ที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่ผลของระบบควบคุมความเร็วจะอยู่ที่กำลังทางกลขาออก (P_m) ที่ใช้ในสมการการแกว่ง (Swing Equation) มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเมื่อภาระของระบบมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อเป็นการปรับความถี่ของระบบให้สามารถทำงานอยู่ที่ระดับความถี่ปกติได้โดยตลอด นอกจากนั้นยังมีส่วนช่วยในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอีกด้วย

4.4 แบบจำลองภาระทางไฟฟ้า (Load Model) [7]

ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) จะประกอบไปด้วยภาระทางไฟฟ้า (Load) มากมายกระจายอยู่ทั้งระบบ การศึกษาในด้านเสถียรภาพชั่วคราว ภาระทางไฟฟ้าได้ถูกแทนด้วยแบบจำลองต่างๆ มากมาย เช่น แบบจำลองภาระทางไฟฟ้าแบบสถิต (Static Load Model) แบบจำลองภาระทางไฟฟ้าแบบพลวัต (Dynamic Load Model) หรือจะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์คงที่ต่อลงกราวด์ (Ground) ก็ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการในการวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในที่นี้ได้ทำการเลือกใช้แบบจำลองสองแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับความละเอียดของแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้างานนี้

1) แบบจำลองภาระทางไฟฟ้าที่มีกำลังคงที่ (Constant Power Load) จะใช้สำหรับการวิเคราะห์ที่มีแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย (Classical Model)

2) แบบจำลองภาระทางไฟฟ้าที่มีกำลังเปลี่ยนแปลงตามแรงดันของบัลที่ภาระทางไฟฟ้านั้นต่ออยู่ สามารถเขียนแทนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4.17)

$$\begin{aligned}
 P_L &= P_o \left[A_1 + A_2 \left(\frac{V}{V_o} \right) + A_3 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 \right] \\
 Q_L &= Q_o \left[\frac{A_2}{2} + \left(A_1 + \frac{A_2}{2} \right) \left(\frac{V}{V_o} \right) + A_3 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 \right]
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

เมื่อ A_1 = เปอร์เซนต์ของกำลังจริงของภาระทางไฟฟ้าสำหรับเงื่อนไขกำลังคงที่
 A_2 = เปอร์เซนต์ของกำลังจริงของภาระทางไฟฟ้าสำหรับเงื่อนไขกระแสคงที่
 A_3 = เปอร์เซนต์ของกำลังจริงของภาระทางไฟฟ้าสำหรับเงื่อนไขอิมพีแดนซ์คงที่
 P_o, Q_o = ค่าเริ่มต้นกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟของภาระทางไฟฟ้า
 V_o = ค่าเริ่มต้นของแรงดันที่บัลซึ่งภาระทางไฟฟ้านั้นๆ ต่ออยู่

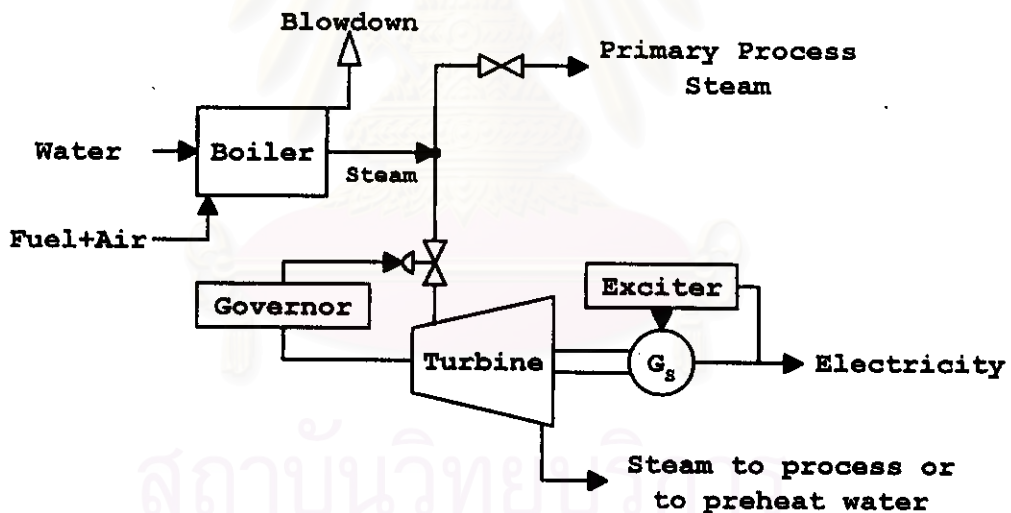
แบบจำลองภาระทางไฟฟ้าแบบนี้จะใช้สำหรับการวิเคราะห์ที่ละเอียดขึ้นกับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่คิดผลของชั่วยั้งเด่น (Saliency) และการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (Change in Field Flux Linkage) ด้วย

4.5 แบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System Model) [1,12]

ระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System) ที่จะได้ทำการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ ระบบผลิตพลังงานร่วมแบบกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) และอีกแบบ คือ ระบบผลิตพลังงานร่วมแบบใช้ระบบพลังงานความร้อนร่วม (Combine Cycle) แบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมและเงื่อนไขการวิเคราะห์ของทั้งสองระบบ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.5.1 แบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมแบบกังหันไอน้ำ (Steam Turbine Cogeneration System Model)

ระบบผลิตพลังงานร่วมแบบที่ใช้กังหันไอน้ำ ส่วนใหญ่เป็นระบบที่ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตมาก และการผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่เพื่อใช้เฉพาะในโรงงานเท่านั้น แบบจำลองของระบบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมแบบกังหันไอน้ำ
(Steam Turbine Cogeneration System Model)

จากแบบจำลองนี้พบว่าไอน้ำ (Steam) ที่ได้จากหม้อต้ม (Boiler) จะแยกใช้งาน 2 ส่วน ส่วนหนึ่งใช้ในกระบวนการผลิต อีกส่วนหนึ่งนำไปขับกังหัน (Turbine) เพื่อผลิตไฟฟ้า โดยมีวาล์วที่ควบคุมโดยระบบควบคุมความเร็ว เป็นตัวควบคุมปริมาณไอน้ำที่จ่ายให้กังหัน (Turbine) โดยทั่วไปความร้อนในหม้อต้ม (Boiler) จะมีการเปลี่ยนระดับได้ค่อนข้างช้า หรือมีค่าคงที่ทางเวลาสูง ใน

กรณีที่เกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบในช่วงเวลาสั้นๆ จะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของหม้อต้ม (Boiler)

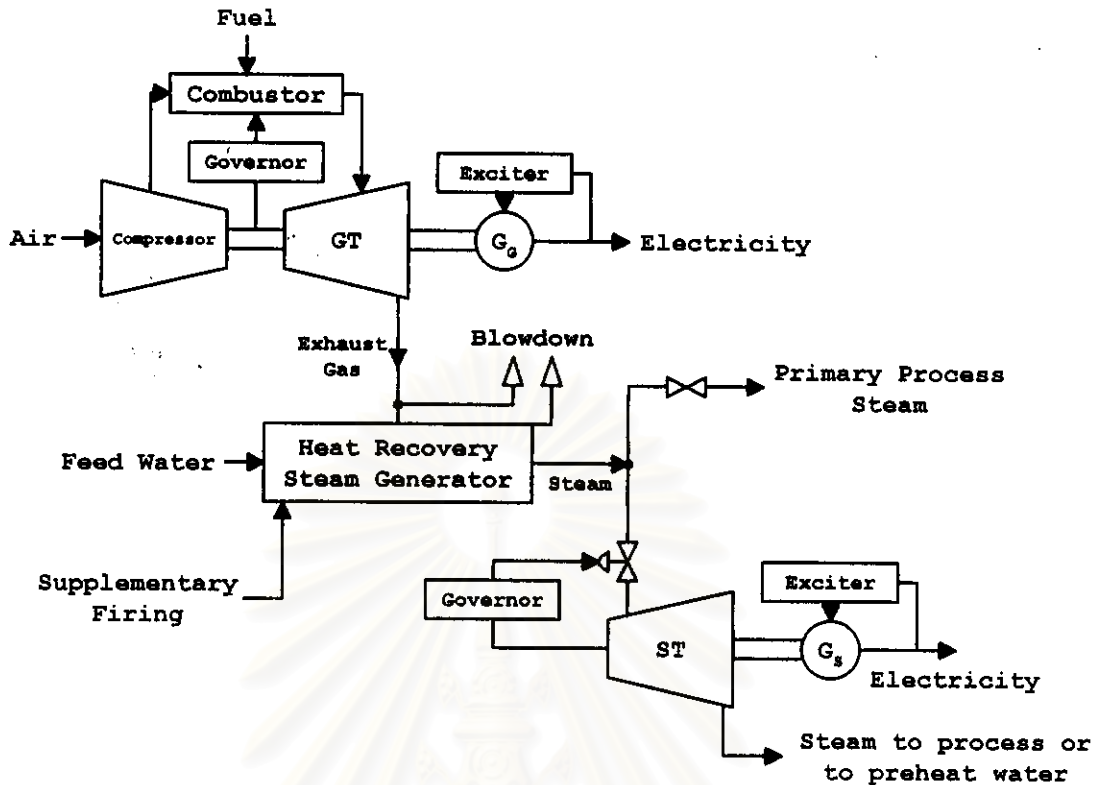
ไอน้ำ (Steam) ที่จ่ายให้กับกระบวนการผลิตและกังหันไอน้ำยังไม่มีเปลี่ยนแปลงในช่วงที่พิจารณา การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) ของระบบผลิตพลังงานร่วมที่ใช้แบบจำลองนี้ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

- 1) แบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้า และระบบควบคุมการกระตุ้นสนามไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมนี้
- 2) หม้อต้ม (Boiler) มีการทำงานเป็นปกติในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient)
- 3) ระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ทำงานได้อย่างอิสระในการควบคุมวาล์วจ่ายไอน้ำ (Steam) ให้กับกังหัน (Turbine) โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต เนื่องจากปริมาณไอน้ำรวมที่ได้จากหม้อต้ม (Boiler) ยังคงเท่าเดิม

4.5.2 แบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมแบบพลังงานความร้อนร่วม (Combine Cycle Cogeneration System Model)

ระบบผลิตพลังงานร่วมแบบพลังงานความร้อนร่วม (Combine Cycle) นี้ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง สามารถผลิตไฟฟ้าได้ปริมาณมาก เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต (Process Steam) ดังนั้นระบบผลิตพลังงานร่วมแบบนี้มักจะมีการขายไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าหลักด้วย อาจเรียกได้ว่าเป็น ผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อย (SPP) หรือผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (IPP) ก็ได้ แบบจำลองของระบบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10

จากระบบจำลองนี้พบว่า การผลิตไฟฟ้าจะได้ออกมา 2 ส่วน ส่วนแรกได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine) ซึ่งมักจะมีกำลังผลิตสูง เมื่อใช้ความร้อนผลิตไฟฟ้าแล้ว ความร้อนที่เหลือก็จะมีการส่งผ่านไปยังหม้อต้ม (Heat Recovery Steam Generator, HRSG) ซึ่งมีระบบให้ความร้อนเสริม (Supplementary Firing) เพื่อรักษาระดับความร้อนในหม้อต้ม (HRSG) ให้คงที่อยู่ด้วย ไอน้ำที่ได้ก็จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งใช้ในการบวนการผลิต อีกส่วนหนึ่งนำไปขับกังหัน (Turbine) เพื่อผลิตไฟฟ้าส่วนที่สองออกมา ในกรณีที่เกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้าขึ้น ในส่วนของ การเผาไหม้ของระบบกังหันก๊าซ (Gas Turbine) สามารถตอบสนองต่อระบบควบคุมความเร็วของ



รูปที่ 4.10 แบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมแบบพลังงานความร้อนร่วม
(Combine Cycle Cogeneration System Model)

กังหันได้เป็นปกติ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่หม้อต้ม (HRSG) ในส่วนนี้มีการเปลี่ยนแปลงไป แต่ในระบบของหม้อต้ม (HRSG) มีส่วนของระบบความร้อนเสริม (Supplementary firing) อยู่ ความร้อนในหม้อต้ม (HRSG) จึงอยู่ในระดับปกติ สำหรับการพิจารณาผลตอบสนองของระบบในช่วงเวลาสั้นๆ ปริมาณไอน้ำที่จ่ายให้กับกระบวนการผลิตและกังหันไอน้ำยังมีค่าคงที่ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) ของระบบผลิตพลังงานร่วมที่ใช้แบบจำลองนี้สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

- 1) แบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้า และระบบควบคุมการกระตุ้นสนาม ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแบบจำลองระบบผลิตพลังงานร่วมนี้
- 2) ระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine) สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต (Process)
- 3) หม้อต้ม (HRSG) มีการทำงานเป็นปกติในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient)

4) ระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ทำงานได้อย่างอิสระในการควบคุมวาล์วจ่ายไอน้ำ (Steam) ให้กับกังหัน (Turbine) โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต เนื่องจากปริมาณไอน้ำรวมที่ได้จากหม้อต้ม (HRSG) ยังคงเท่าเดิม

เนื้อหาในบทนี้ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองของระบบขึ้นมา โดยทั่วไประบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันก็จะมีแบบจำลองที่แตกต่างกันออกไป เพื่อแสดงคุณสมบัติที่แท้จริงของระบบนั้นๆ ออกมาที่จะได้กล่าวถึงต่อไปก็คือ การนำแบบจำลองที่ได้เหล่านี้ ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า ดังจะได้แสดงในบทต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย