

บทที่ 3

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC

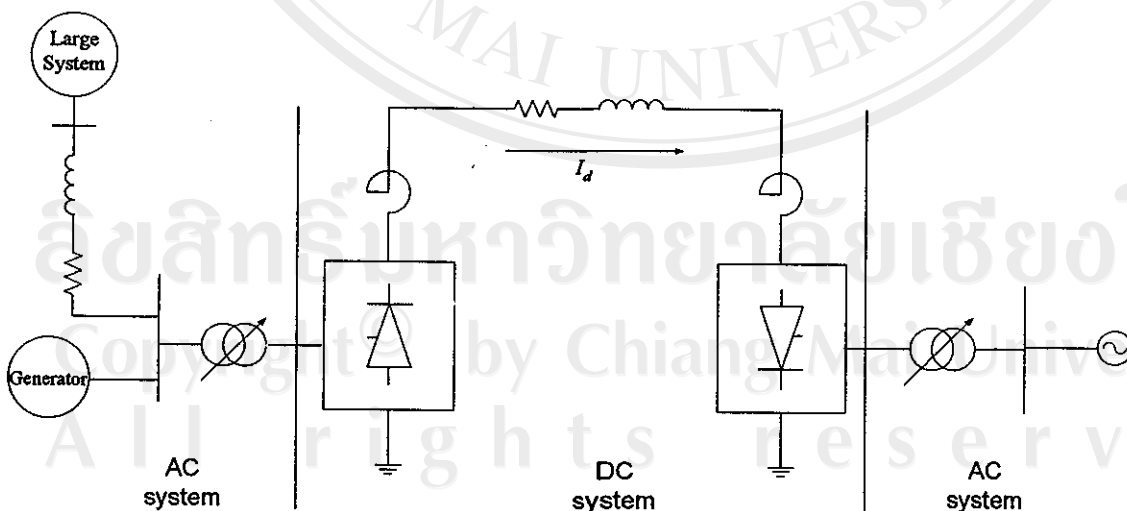
ในบทนี้จะกล่าวถึง การวิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีระบบ HVDC เชื่อมต่อกับระบบ โดยเป็นการวิเคราะห์ในกรณีมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC และ ขั้นตอนการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม DIgSILENT Power Factory พร้อมทั้งยกตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

3.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC

ลักษณะของระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1 โดยระบบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นระบบ AC กับ ส่วนที่เป็นระบบ DC โดยที่แต่ละส่วนประกอบด้วย

ส่วนที่เป็นระบบ AC ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, วงจรสมมูลของระบบทั้งหมด (Equivalent Network) และ หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

ส่วนที่เป็นระบบ DC จะประกอบด้วย ตัวคอนเวอร์เตอร์, รีแอกเตอร์ราบเรียบ (Smoothing Reactor) และสายส่ง DC



รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC

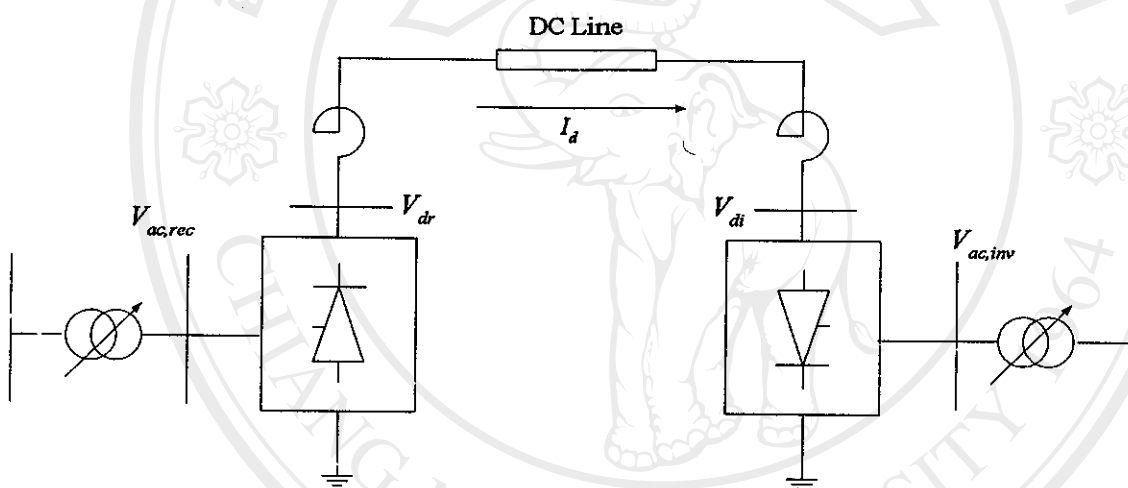
จากระบบ AC – DC ในรูปที่ 3.1 สามารถเขียนเป็นแบบจำลองในแต่ละส่วนของระบบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ดังนี้

3.1.1 แบบจำลองในสภาวะคงตัว (Steady State Modeling)

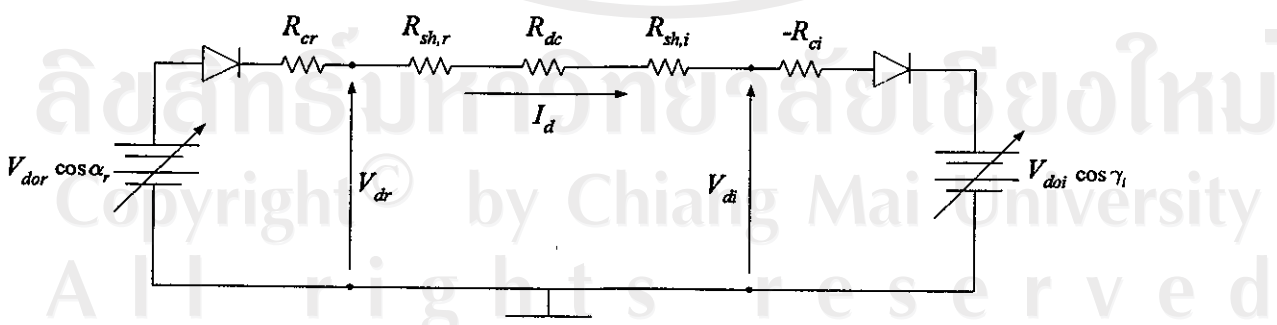
เป็นแบบจำลองเพื่อใช้หาค่าต่างๆในระบบ เมื่อระบบทำงานที่จุดทำงานจุดหนึ่ง โดยแบบจำลองในสภาวะคงตัวจะนำมาใช้ในการคำนวณโหลดฟลักซ์ของระบบ

3.1.1.1 แบบจำลองของระบบ DC

กำหนดให้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าจากด้าน เรกติไฟเออร์ ไปด้าน อินเวอร์เตอร์ โดยสามารถแสดงการทำงานของระบบ DC ได้ดังรูปที่ 3.2 และวงจรสมมูลของระบบ DC แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 การทำงานของระบบ DC



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของระบบ DC

จากรูปที่ 3.3 $R_{sh,r}, R_{sh,i}$ คือ ความต้านทานในตัวรีแอคเตอร์ราบเรียบ
 R_{dc} คือ ความต้านทานในสายส่ง DC
 R_{cr}, R_{ci} คือ ความต้านทานการสับเปลี่ยน

โดยที่

$$R_{cr} = \frac{3}{\pi} X_{cr} \quad (3.1)$$

$$R_{ci} = \frac{3}{\pi} X_{ci} \quad (3.2)$$

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r V_{ac,rec} B_r \quad (3.3)$$

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i V_{ac,inv} B_i \quad (3.4)$$

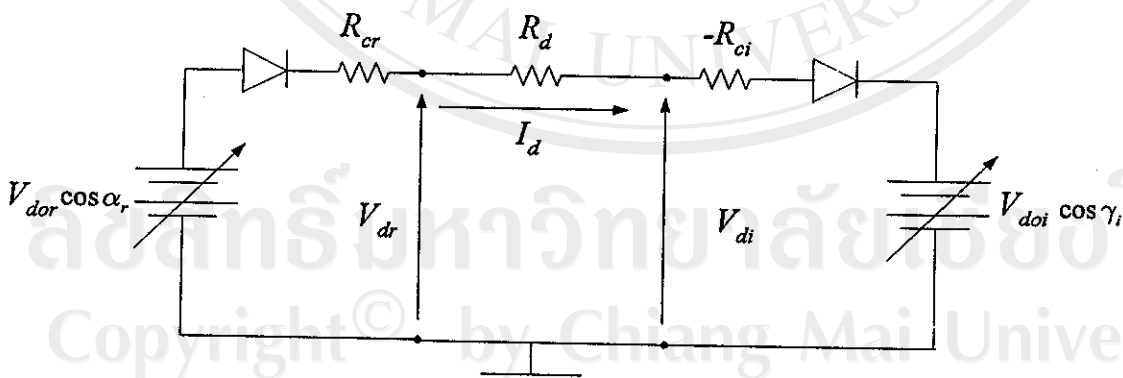
เมื่อ a_r, a_i คือ ค่าเทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์
 B_r, B_i คือ จำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์

ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ สามารถดูได้จากพื้นฐานเกี่ยวกับระบบHVDC ในบทที่ 2

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.3 สามารถสรุปรวมค่าความต้านทานในระบบได้เป็น

$$R_d = R_{sh,r} + R_{dc} + R_{sh,i} \quad (3.5)$$

สามารถเขียนวงจรสมมูลใหม่ได้เป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของระบบ DC เมื่อสรุปรวมค่าความต้านทานในระบบ

สามารถหาสมการในแต่ละด้านของวงจรได้ดังนี้

ด้านอินเวอร์เตอร์

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i V_{ac,inv} B_i \cos \gamma_i - R_{ci} I_d \quad (3.6)$$

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าไหลจากด้าน เรกติไฟเออร์ ไปด้าน อินเวอร์เตอร์ จะต้องควบคุม แรงดัน V_{di} ให้มีค่าคงที่ตลอด ระหว่างที่กำลังไฟฟ้ามมีการเปลี่ยนแปลง โดยการควบคุมแทปของ หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ (α_i)

ค่ามุมประวิง (α_i) และมุมเหลื่อม (μ_i) หาได้จาก [4] มีค่าเท่ากับ

$$\beta_i = \cos^{-1} \left[2 \frac{V_{di}}{V_{doi}} - \cos \gamma_i \right] \quad (3.7)$$

$$\mu_i = \beta_i - \gamma_i \quad (3.8)$$

$$\alpha_i = 180^\circ - \beta_i \quad (3.9)$$

ค่ากระแสตรงที่ไหลในระบบ มีค่าเท่ากับ

$$I_d = \frac{P_i}{V_{di}} \quad (3.10)$$

เมื่อ P_i คือ กำลังไฟฟ้าด้านอินเวอร์เตอร์ (คือ กำลังไฟฟ้าที่ ต้องการให้ระบบ HVDC ส่งผ่าน)

ด้านเรกติไฟเออร์

แรงดันด้านเรกติไฟเออร์มีค่าเท่ากับ

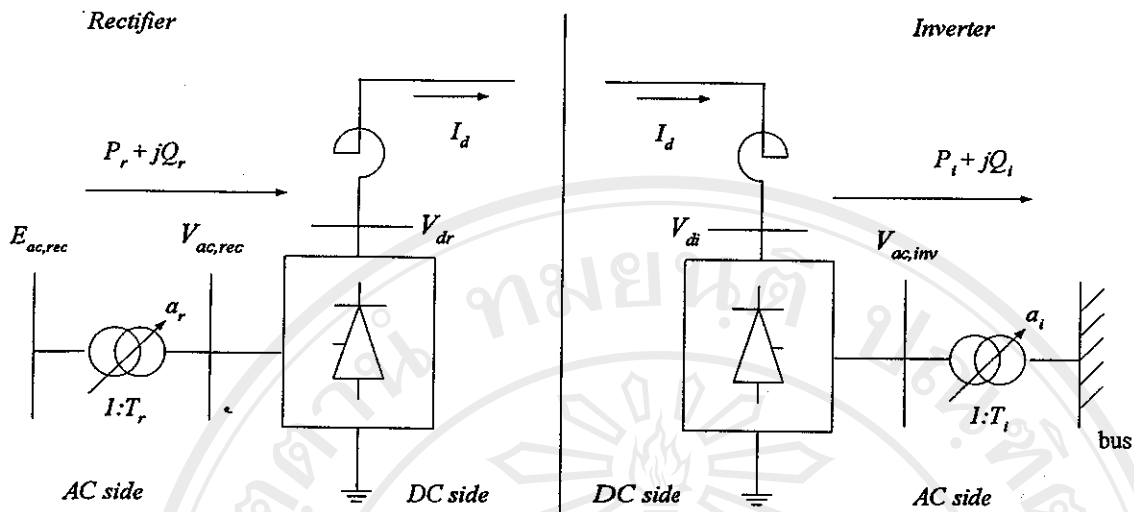
$$V_{dr} = V_{di} + I_d R_d \quad (3.11)$$

ค่าแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ได้จาก

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r V_{ac,rec} B_r \cos \alpha_r - R_{cr} I_d \quad (3.12)$$

3.1.1.2 แบบจำลอง AC-DC คอนเวอร์เตอร์

แบบจำลอง AC-DC คอนเวอร์เตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลอง AC-DC คอนเวอร์เตอร์ ทั้งด้านเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์

เมื่อ ไม่คิดค่าความสูญเสียในหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ สามารถวิเคราะห์ระบบได้ดังนี้
ด้านเรกติไฟเออร์

กำลังไฟฟ้าจริง มีค่าเท่ากับ

$$P_r = V_{dr} I_d \quad (3.13)$$

ตัวประกอบกำลัง มีค่าเท่ากับ

$$\cos \theta_r = \frac{V_{dr}}{V_{dor}} \quad (3.14)$$

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มีค่าเท่ากับ

$$Q_r = P_r \tan \theta_r \quad (3.15)$$

แรงดันดันปฐมภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ

$$E_{ac,rec} = \frac{a_r}{T_r} V_{ac,rec} \quad (3.16)$$

เมื่อ T_r คือ อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

ด้านอินเวอร์เตอร์

กำลังไฟฟ้าจริง มีค่าเท่ากับ

$$P_i = V_{di} I_d \quad (3.17)$$

ตัวประกอบกำลัง มีค่าเท่ากับ

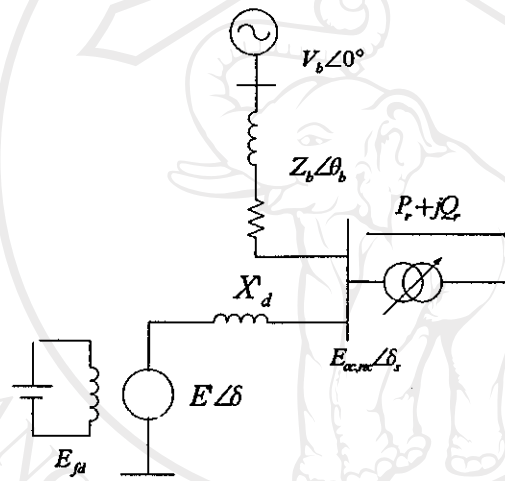
$$\cos \theta_i = \frac{V_{di}}{V_{doi}} \quad (3.18)$$

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มีค่าเท่ากับ

$$Q_i = P_i \tan \theta_i \quad (3.19)$$

3.1.1.3 ระบบจ่ายระบบ AC

จากระบบรวมในรูปที่ 3.1 ส่วนของระบบ AC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบไฟฟ้า AC (AC Power System)

จากรูปที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ AC คือ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

E' คือ ขนาดแรงดันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

δ คือ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

X'_d คือ ค่ารีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกน d

E_{fd} คือ แรงดันขดลวดสนาม

ระบบภายนอกที่เชื่อมต่อ (Large System)

V_b คือ ขนาดแรงดันบัสที่เชื่อมต่อกับระบบภายนอก

Z_b คือ ขนาดอิมพีแดนซ์สมมูล (Equivalent Impedance)

θ_b คือ มุมของอิมพีแดนซ์สมมูล

บัสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

δ_s คือ มุมของแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

เมื่อทำการสมดุลสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาที่บัสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ พบว่า

$$\frac{E_{ac,rec} E'}{X'_d} \sin(\delta_s - \delta) + \left[\frac{E_{ac,rec}^2}{Z_b} \cos \theta_b - \frac{E_{ac,rec} V_b}{Z_b} \cos(\theta_b + \delta_s) \right] + P_r = 0 \quad (3.20)$$

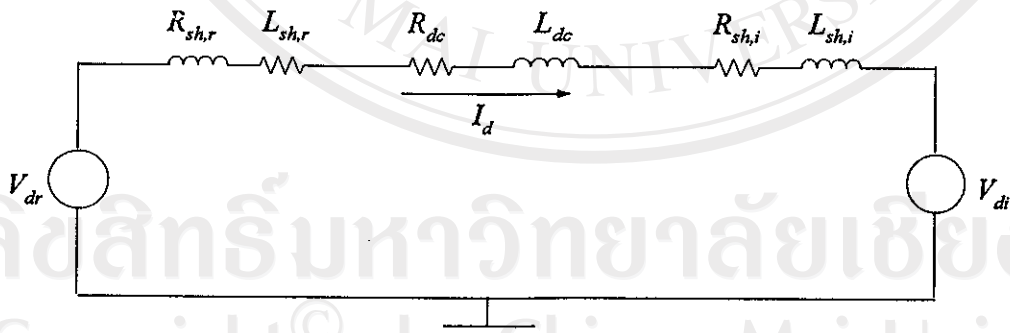
$$\left[\frac{E_{ac,rec}^2}{X'_d} - \frac{E_{ac,rec} E'}{X'_d} \cos(\delta_s - \delta) \right] + \left[\frac{E_{ac,rec}^2}{Z_b} \sin \theta_b - \frac{E_{ac,rec} V_b}{Z_b} \sin(\theta_b + \delta_s) \right] + Q_r = 0 \quad (3.21)$$

3.1.2 แบบจำลองในสถานะพลวัต (Dynamic Modeling)

เป็นแบบจำลองที่มีค่าขึ้นกับเวลา ใช้สำหรับวิเคราะห์ระบบในสถานะชั่วครู่ (Transient Analysis) การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC สามารถทำได้ด้วยการควบคุมแรงดัน DC ให้มีค่าคงที่ และควบคุมกระแสตรงเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ

3.1.2.1 แบบจำลองสายส่ง DC

แบบจำลองสายส่ง DC ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์สถานะพลวัตในสายส่ง DC

จากรูปที่ 3.7 $L_{sh,r}, L_{sh,i}$ คือ ตัวเหนี่ยวนำของตัวรีแอคเตอร์ราบเรียบ
 L_{dc} คือ ตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง DC

กำหนดให้

$$R_d = R_{sh,r} + R_{dc} + R_{sh,i} \quad (3.22)$$

$$L_d = L_{sh,r} + L_{dc} + L_{sh,i} \quad (3.23)$$

จากวงจรในรูปที่ 3.7

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} [V_{dr} - V_{di} - R_d I_d] \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.24) พบว่าเวลาการตอบสนองของกระแส I_d จะมีค่าขึ้นกับค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในระบบ

3.1.2.2 แบบจำลองระบบควบคุมใน HVDC

ระบบควบคุมเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC จะประกอบด้วย

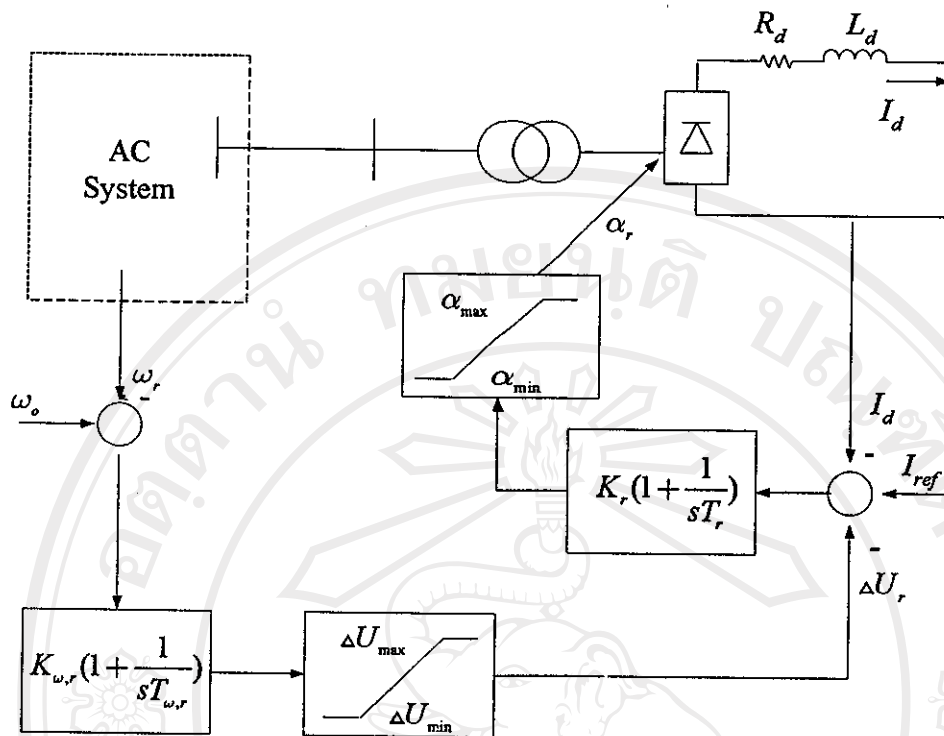
ตัวควบคุมความถี่ (Frequency Controller) ใช้ควบคุมความถี่จากระบบ AC เพื่อให้ความถี่ในการจุดชนวนของตัวคอนเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ตลอด

ตัวควบคุมกระแส (Current Controller) ใช้ปรับค่ากระแส DC เพื่อให้ได้ค่ากำลังตามที่ต้องการ

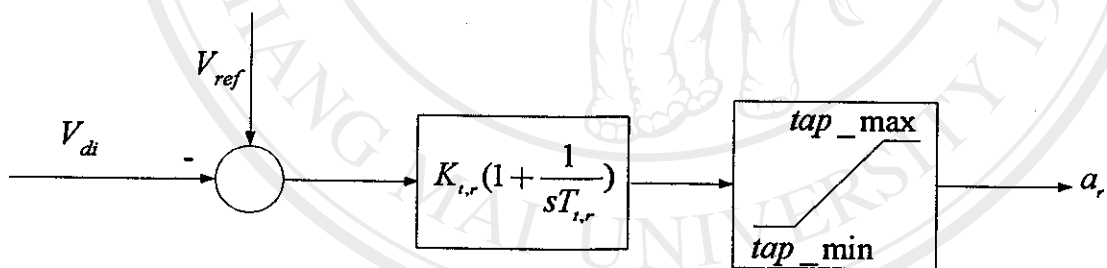
ตัวควบคุมแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ (Tap Changer Controller) ใช้ควบคุมค่าแรงดัน DC ให้มีค่าคงที่ (V_{ref})

จากระบบในรูปที่ 3.1 เมื่อต้องการปรับค่ากระแส I_d เป็นค่ากระแส I_{ref} เพื่อเป็นการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC โดยด้านเรกติไฟเออร์จะมีลักษณะระบบควบคุมความถี่และควบคุมกระแส แสดงในรูปที่ 3.8 และตัวควบคุมแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ แสดงในรูปที่ 3.9

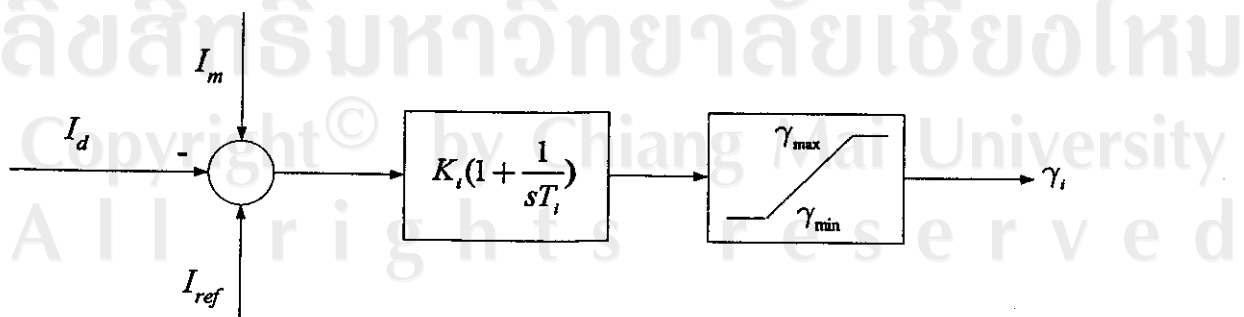
ส่วนด้านอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากระบบต่อกับบัสอนันต์ (Infinite Bus) จึงไม่ต้องควบคุมความถี่ โดยตัวควบคุมกระแสและตัวควบคุมแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ด้านอินเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



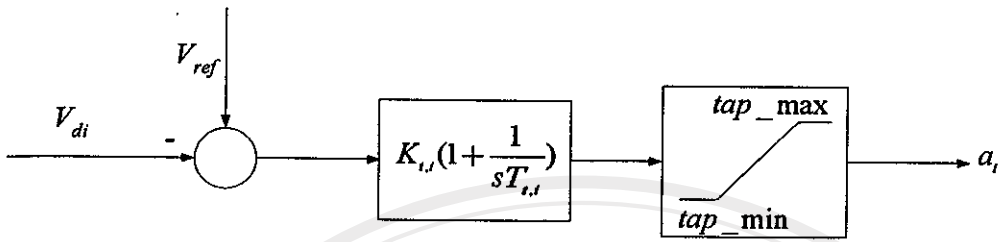
รูปที่ 3.8 ระบบควบคุมความถี่และควบคุมกระแสด้าน เรกติไฟเออร์



รูปที่ 3.9 ตัวควบคุมแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ด้าน เรกติไฟเออร์



รูปที่ 3.10 ตัวควบคุมกระแสด้าน อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.11 ตัวควบคุมแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ด้าน อินเวอร์เตอร์

ตัวควบคุมความถี่

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{K_{\omega,r}}{T_{\omega,r}}(\omega_0 - \omega_r) \quad (3.25)$$

$$\Delta U_r = K_{\omega,r}(\omega_0 - \omega_r) + X_1 \quad (3.26)$$

ตัวควบคุมกระแส

ด้านเรกติไฟเออร์

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{K_r}{T_r}(I_{ref} - I_d - \Delta U_r) \quad (3.27)$$

$$\alpha_r = K_r(I_{ref} - I_d - \Delta U_r) + X_2 \quad (3.28)$$

ด้านอินเวอร์เตอร์

$$\frac{dX_3}{dt} = \frac{K_i}{T_i}(I_{ref} - I_d - I_m) \quad (3.29)$$

$$\gamma_i = K_i(I_{ref} - I_d - I_m) + X_3 \quad (3.30)$$

ตัวควบคุมแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

ด้านเรกติไฟเออร์

$$\frac{dX_4}{dt} = \frac{K_{t,r}}{T_{t,r}}(V_{ref} - V_{di}) \quad (3.31)$$

$$\alpha_r = K_{t,r}(V_{ref} - V_{di}) + X_4 \quad (3.32)$$

ด้านอินเวอร์เตอร์

$$\frac{dX_5}{dt} = \frac{K_{t,i}}{T_{t,i}}(V_{ref} - V_{di}) \quad (3.33)$$

$$\alpha_i = K_{t,i}(V_{ref} - V_{di}) + X_5 \quad (3.34)$$

3.1.2.3 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับสวิตช์ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีแรงดันเท่ากับ $E_{ac,rec} \angle \delta_s$ สามารถเขียนสมการแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะพลวัตได้จาก [15]

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.35)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = P_m - \frac{E' E_{ac,rec}}{X'_d} \sin(\delta - \delta_s) - D\omega \quad (3.36)$$

$$\frac{dE'}{dt} = \frac{(X_d - X'_d)}{\tau'_{do}} \left[\frac{E_{fd} - E'}{X_d - X'_d} - \frac{E'}{X'_d} + \frac{E_{ac,rec} \cos(\delta - \delta_s)}{X'_d} \right] \quad (3.37)$$

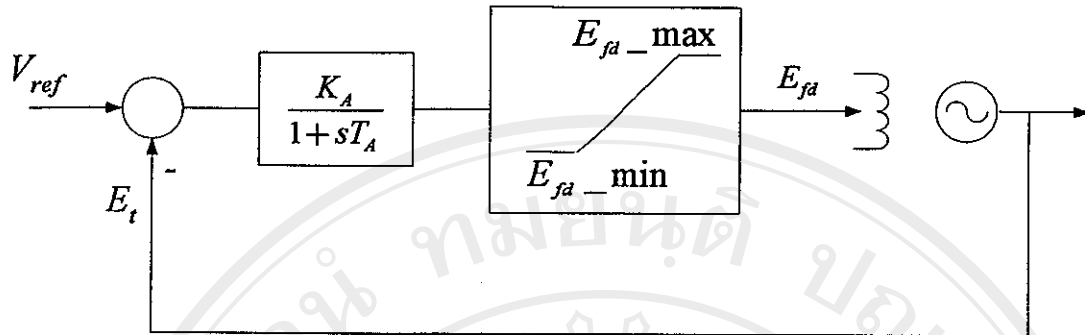
เมื่อ	P_m	คือ	กำลังกลขาเข้าของแกนโรเตอร์ ลบด้วยกำลังสูญเสียในการหมุน
	D	คือ	ค่าคงที่การหน่วง
	X_d	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ในแนวแกน d
	τ'_{do}	คือ	ค่าคงตัวเวลาชั่วคราวในแนวแกน d ในภาวะเปิดวงจร (d axis Transient Open Circuit Time Constant)

3.1.2.4 แบบจำลองอุปกรณ์ควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัท

จากหัวข้อที่ 2.14 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยระบบควบคุม 2 ชนิด คือ AVR และ ตัวบังคับ (Governor) โดยสามารถเขียนเป็นแบบจำลองในสภาวะพลวัต ได้ดังนี้

ตัวคุมค่าแรงดันอัตโนมัติ (Auto Voltage Regulator, AVR)

จาก [15] แบบจำลองของ AVR แสดงดังรูปที่ 3.12



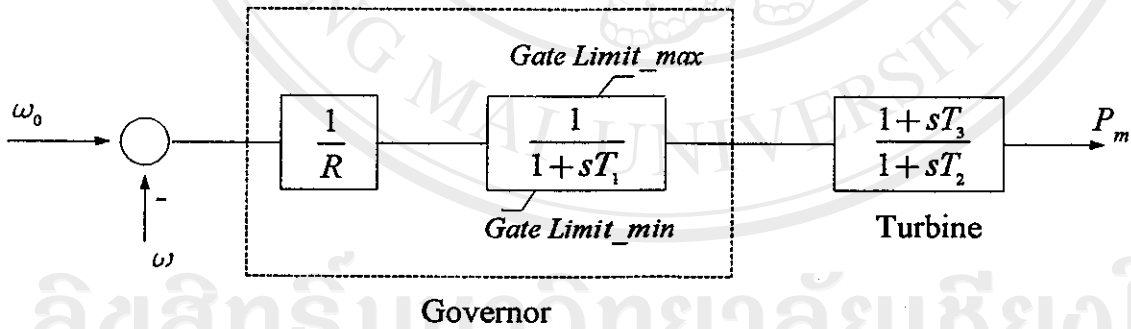
รูป 3.12 แบบจำลองของตัว AVR

จากรูปที่ 3.12

$$\frac{dE_{fa}}{dt} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - E_t) - \frac{E_{fa}}{T_A} \quad (3.38)$$

เมื่อ E_t คือ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวบังคับ (Governor)

จาก [5] แบบจำลองของตัวบังคับ แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แบบจำลองของตัวบังคับ

จากรูปที่ 3.13

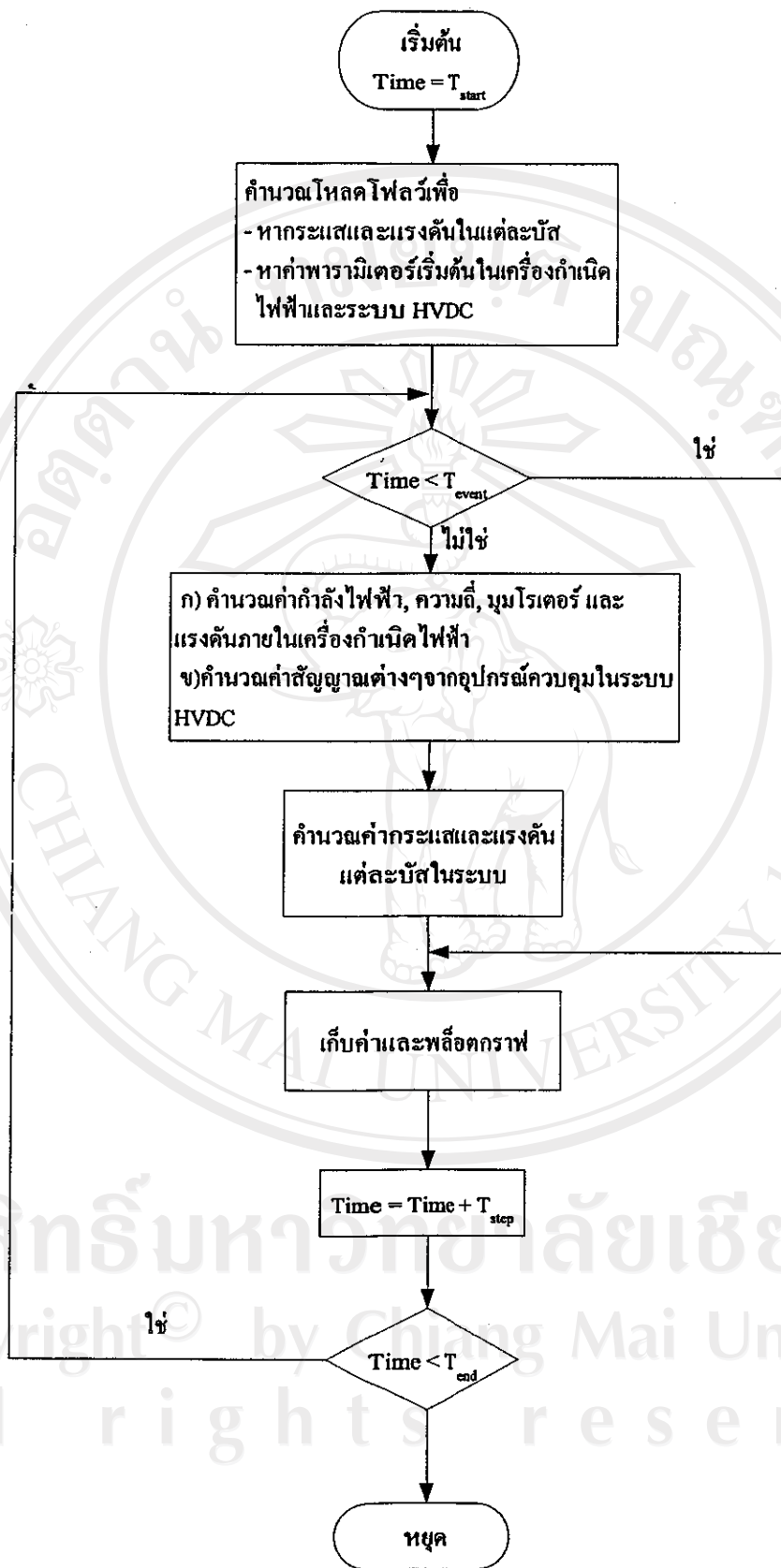
$$\frac{dX_6}{dt} = \frac{1}{T_1} \left[\frac{1}{R} (\omega_0 - \omega) - X_6 \right] \quad (3.39)$$

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_2} \left[T_3 \cdot \frac{dX_6}{dt} + X_6 - P_m \right] \quad (3.40)$$

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC สามารถแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ได้ดังนี้

- (1) ที่เวลาเริ่มต้น T_{start} คำนวณโหลดโฟลว์เพื่อคำนวณหาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า, ค่ากระแสและค่าแรงดันในแต่ละบัส และค่าพารามิเตอร์ที่สถานะเริ่มต้น (Initial Condition) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ค่ากำลังไฟฟ้า, มุมโรเตอร์, ความถี่ และ แรงดันภายใน เป็นต้น) และค่าพารามิเตอร์ในระบบ HVDC (ค่ามุมต่างๆ และ แทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์)
- (2) เช็คว่าเวลา (T) ว่าเท่ากับ ค่าเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC (T_{event}) หรือไม่
 - ถ้าเวลาน้อยกว่า T_{event} ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ให้ทำ (3)
 - ถ้าเวลามากกว่าหรือเท่ากับ T_{event} ระบบมีการเปลี่ยนแปลง ให้ทำ (6)
- (3) เก็บค่าที่คำนวณได้และพล็อตกราฟ
- (4) เพิ่มเวลาที่ละขั้นตอนเวลา (Time step, T_{step})
- (5) เช็คว่าเวลาว่า เท่ากับ ค่าเวลาสิ้นสุด (T_{end}) หรือไม่
 - ถ้าเวลาไม่เท่ากับ T_{end} ไป (2)
 - ถ้าเวลาเท่ากับ T_{end} ไป (9)
- (6) ที่เวลา T_{event} มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC ให้คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จาก (1) ที่เปลี่ยนแปลงไปในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ระบบ HVDC
- (7) คำนวณค่ากระแสและแรงดันแต่ละบัสในระบบทั้งหมด (ระบบ AC และ DC ทั้งหมด)
- (8) ทำตามขั้นตอน (3) ถึง (7)
- (9) สิ้นสุดการทำงาน



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเมื่อมีระบบ HVDC เชื่อมต่อในระบบ

3.3 โปรแกรม DigSILENT Power Factory

โปรแกรม DigSILENT ย่อมาจาก DIgital SImuLator for Electrical NeTwork เป็นโปรแกรมที่พัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 ในประเทศเยอรมัน ปัจจุบันโปรแกรมมีการพัฒนาถึง 13 รุ่น ความสามารถของโปรแกรมคือใช้การวิเคราะห์ด้านต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ การวิเคราะห์โหลดโฟลว์, การวิเคราะห์การลัดวงจร, การวิเคราะห์ในสภาวะพลวัต (Dynamic State), การวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transient), การวิเคราะห์ระบบป้องกัน และการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เป็นต้น โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งระบบ AC และ DC

3.4 ขั้นตอนการทำงานเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC ด้วยโปรแกรม DigSILENT Power Factory

โปรแกรมที่ใช้เป็น DigSILENT Power Factory เวอร์ชันที่ 13 บี 220 (ver.13b220) มีขั้นตอนการทำงานเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC ดังนี้

- (1) วาดแผนภาพเส้นเดียวของระบบทั้งหมด
- (2) จัดหาข้อมูลพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ
- (3) ตรวจสอบความแข็งแรงของระบบ AC/DC
- (4) กำหนดค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ AC
- (5) กำหนดค่าโหลดโฟลว์และคำนวณหาพารามิเตอร์ในภาวะเริ่มต้น (Initial Condition)
- (6) เปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ HVDC
- (7) วิเคราะห์ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC ส่งผลต่อเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบอย่างไรบ้าง โดยดูจากค่ากำลังทางไฟฟ้า, มุมโรเตอร์, ความถี่ และ แรงดัน

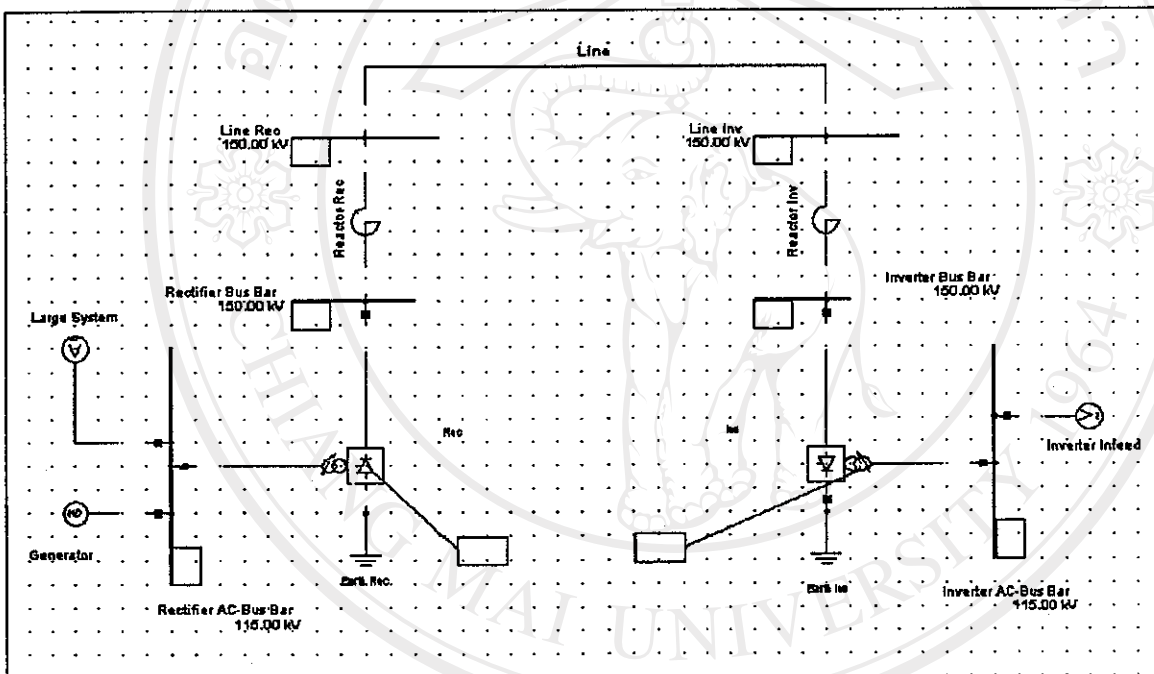
3.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC ด้วยโปรแกรม DigSILENT Power Factory

ระบบที่ใช้ในการทดสอบ เป็นระบบแบบเดียวกับระบบในรูปที่ 3.1 โดยระบบ AC มีขนาดแรงดัน 115 kV ความถี่ 50 Hz ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 MVA (ตัวประกอบกำลัง = 0.8) เชื่อมต่อกับระบบภายนอก (Large System)

ระบบ HVDC เป็นชนิด 6 พัลส์ แบบโมโนโพลาร์ มีพิกัดแรงดัน 150 kV พิกัดกระแส 1 kA ต้องการวิเคราะห์ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC จาก 15 MW ($I_d=0.1$ kA) เป็น 150 MW ($I_d=1.0$ kA) สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DIgSILENT Power Factory ได้ตามขั้นตอนดังนี้

(1) แผนภาพเส้นเดียวของระบบ

จากข้อมูลระบบที่ต้องการวิเคราะห์ สามารถเขียนระบบเป็นแผนภาพเส้นเดียวในโปรแกรม DIgSILENT Power Factory ได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพเส้นเดียวของระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม DIgSILENT Power Factory

(2) ข้อมูลพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ

ข้อมูลพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

ข้อมูลระบบ DC

$$R_{sh,r} = 0.05 \, \Omega$$

$$R_{sh,i} = 0.05 \, \Omega$$

$$L_{sh,r} = 1 \, \text{H}$$

$$L_{sh,i} = 1 \, \text{H}$$

$$R_{dc} = 10 \, \Omega$$

$$L_{dc} = 0.127 \, \text{H}$$

$$X_{cr} = 5 \, \Omega$$

$$X_{ci} = 5 \, \Omega$$

ข้อมูล AC-DC คอนเวอร์เตอร์

$$T_r = 1.0$$

$$T_i = 1.0$$

ข้อมูลระบบ AC

- ข้อมูลระบบภายนอก

$$V_b = 115 \text{ kV}$$

$$Z_b = 50 \text{ } \Omega$$

$$\theta_b = 90^\circ$$

- ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$X_d = 2 \text{ p.u.}$$

$$X_q = 0.91 \text{ p.u.}$$

$$X'_d = 0.3 \text{ p.u.}$$

$$\tau'_{do} = 4.67 \text{ s}$$

$$H = 5.0 \text{ s}$$

$$D = 0.0 \text{ p.u.}$$

$$pf = 0.8$$

อุปกรณ์ควบคุมต่างๆ

- ตัวควบคุมความถี่

$$K_{\omega,r} = 5$$

$$T_{\omega,r} = 10$$

$$\Delta U_{\max} = 1.2 \text{ p.u.}$$

$$\Delta U_{\min} = 0.8 \text{ p.u.}$$

- ตัวควบคุมกระแส

$$K_r = 0.3$$

$$T_r = 0.03$$

$$\alpha_{\max} = 90^\circ$$

$$\alpha_{\min} = 5^\circ$$

$$K_i = 0.3$$

$$T_i = 0.03$$

$$\gamma_{\max} = 90^\circ$$

$$\gamma_{\min} = 20^\circ$$

$$I_m = 0.0$$

- ตัวควบคุมแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

$$K_{t,r} = 0.5$$

$$T_{t,r} = 0.7$$

$$K_{t,i} = 0.5$$

$$T_{t,i} = 0.7$$

$$tap_{\max} = 1.2 \text{ p.u.}$$

$$tap_{\min} = 0.95 \text{ p.u.}$$

- ตัวคุมค่าแรงดันแบบอัตโนมัติ (AVR)

$$K_A = 200$$

$$T_A = 0.05$$

$$E_{fd_max} = 7.0$$

$$E_{fd_min} = -6.4$$

- ตัวบังคับ (Governor)

$$R = 0.017$$

$$T_1 = 1.0$$

$$T_2 = 6.0$$

$$T_3 = 2.0$$

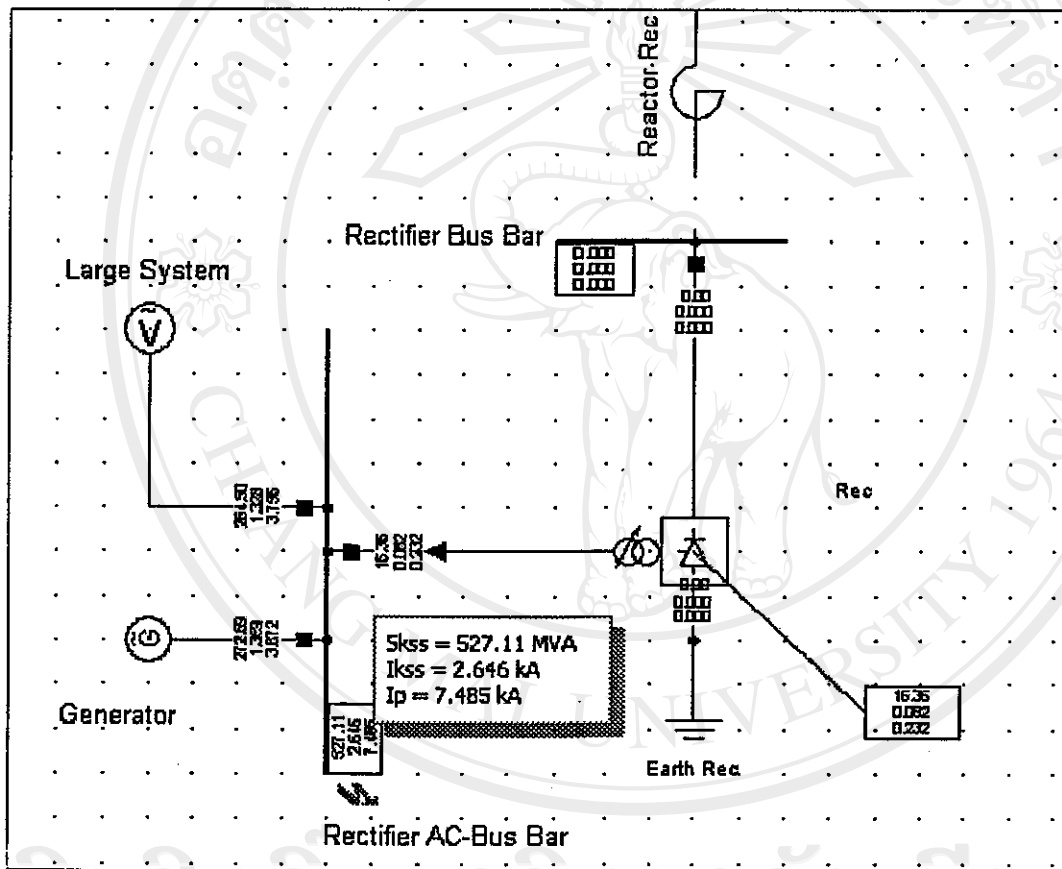
$$Gate\ Limit_max = 1.0$$

$$Gate\ Limit_min = 0.0$$

(3) ตรวจสอบความแข็งแรงของระบบ AC/DC

จากหัวข้อ 2.4 สามารถตรวจสอบความแข็งแรงโดยหาค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่บัสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

จากการคำนวณในโปรแกรม DIGSILENT Power Factory ได้ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 527.11 MVA แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่บัสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

ระบบ HVDC มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 150 MW แทนค่าทั้งหมดในสมการ (2.20) พบว่าค่า ESCR เท่ากับ 3.51 ซึ่งถือว่าเป็นระบบที่มีความแข็งแรงน้อย ระบบจึงสูญเสียเสถียรภาพได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบ

- (4) กำหนดค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ AC

ระบบ DC

กำหนดให้กำลังไฟฟ้า 15 MW ไหลจากด้านเรกติไฟเออร์ ไปด้านอินเวอร์เตอร์ โดยที่

$$I_d = 0.1 \text{ kA} \quad V_{di} = 150 \text{ kV} \quad \alpha_r = 22.2^\circ \quad \gamma_i = 22.2^\circ$$

ระบบ AC

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (P_g) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_g) มีค่าดังนี้

$$P_g \quad \text{จ่าย} \quad 30 \quad \text{MW} \quad (\text{คิดเป็น } 0.75 \text{ p.u.})$$

$$Q_g \quad \text{จ่าย} \quad 6.72 \quad \text{MVar} \quad (\text{คิดเป็น } 0.22 \text{ p.u.})$$

- (5) คำนวณโหลดโพลาร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในภาวะเริ่มต้น

จากการคำนวณโหลดโพลาร์ในโปรแกรม DIGSILENT Power Factory โดยคำนวณด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ ได้ดังนี้

ระบบ DC

- ด้านเรกติไฟเออร์

$$\begin{aligned} V_{dr} &= 151.01 \text{ kV} & P_r &= 15.1 \text{ MW} & Q_r &= 6.3 \text{ MW} \\ \alpha_r &= 22.2^\circ & \mu_r &= 0.869^\circ & \gamma_r &= 156.931^\circ \\ \alpha_r &= 1.054 \end{aligned}$$

- ด้านอินเวอร์เตอร์

$$\begin{aligned} V_{di} &= 150.0 \text{ kV} & P_i &= -15.0 \text{ MW} & Q_i &= 6.25 \text{ MW} \\ \alpha_i &= 156.925^\circ & \mu_i &= 0.875^\circ & \gamma_i &= 22.2^\circ \\ \alpha_i &= 1.046 \end{aligned}$$

ระบบ AC

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$E_t = E_{ac,rec} = 115 \text{ kV} \quad \delta = 25.18^\circ$$

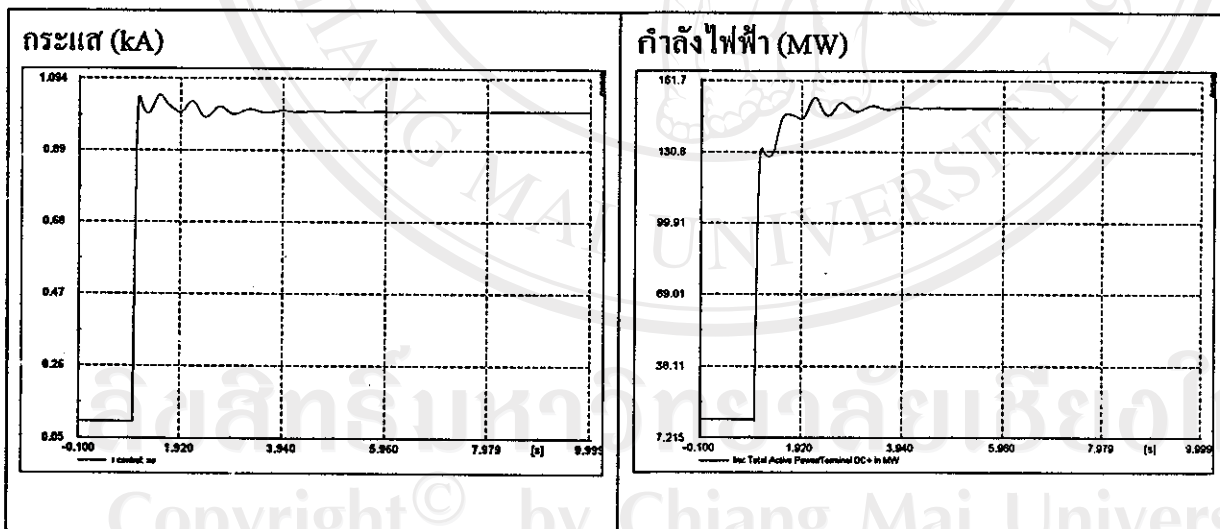
(6) เปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ HVDC

ในกรณีต้องการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC จาก 15 MW เป็น 150 MW สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่ากระแส I_d จาก 0.1 kA เป็น 1.0 kA

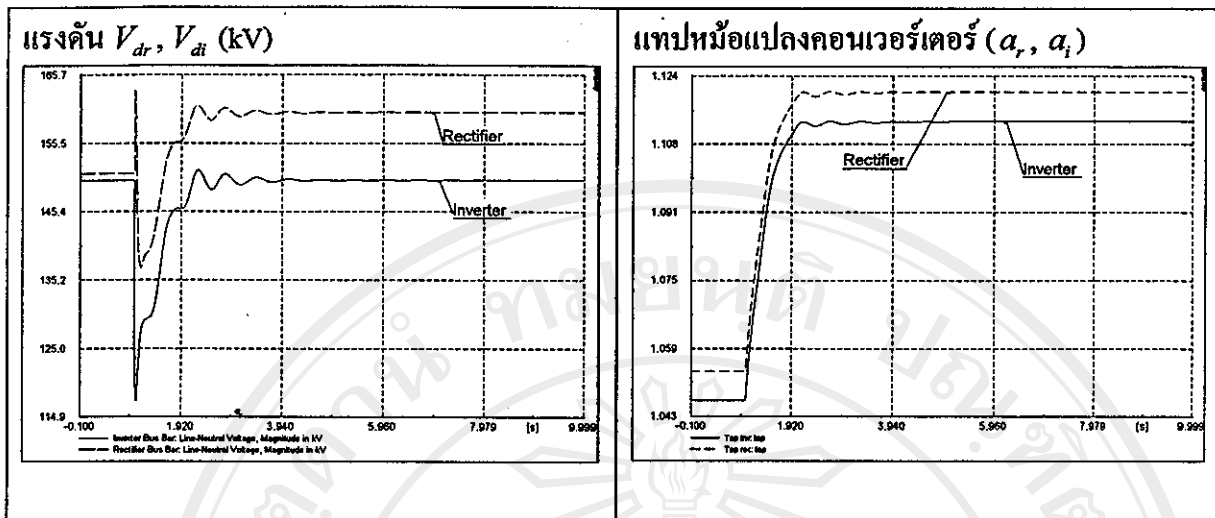
กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่เวลา (T_{event}) 1 วินาที ทำการวิเคราะห์เป็นเวลา (T_{end}) 10 วินาที โดยในการคำนวณกำหนดขั้นเวลา (T_{step}) ที่ใช้เท่ากับ 0.01 วินาที วิธีการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรม DigSILENT Power Factor เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คือ วิธีนิวตัน-ราฟสัน (New ton-Raphson based iterations)

(7) วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ HVDC

จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโปรแกรม DigSILENT Power Factor พบว่า ค่ากระแส, กำลังไฟฟ้า, แรงดัน และ ค่าเทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบ HVDC แสดงการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 3.17

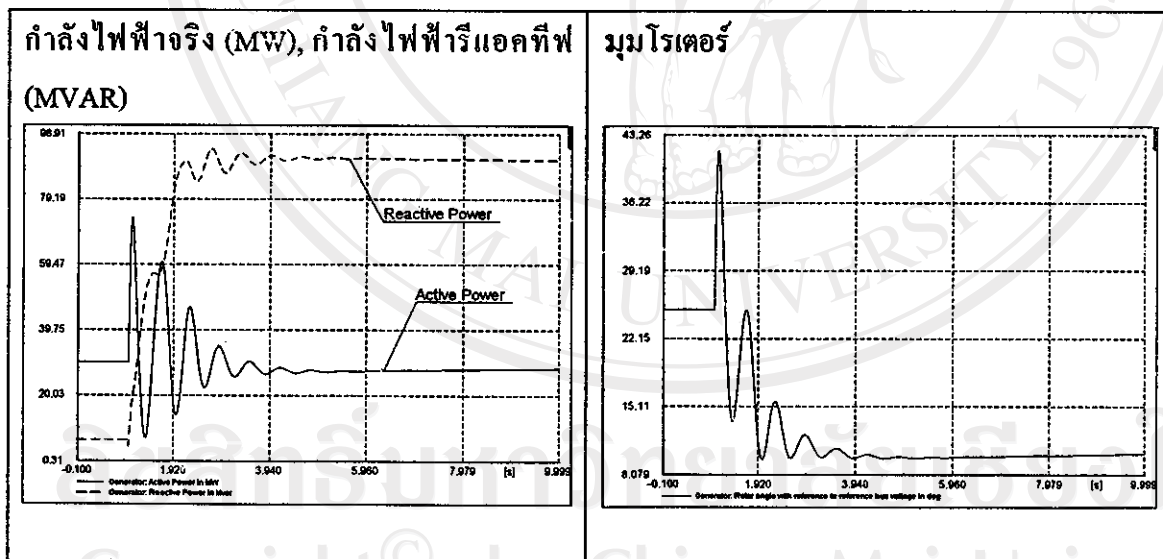


รูปที่ 3.17 ผลกระทบต่อระบบ HVDC เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC



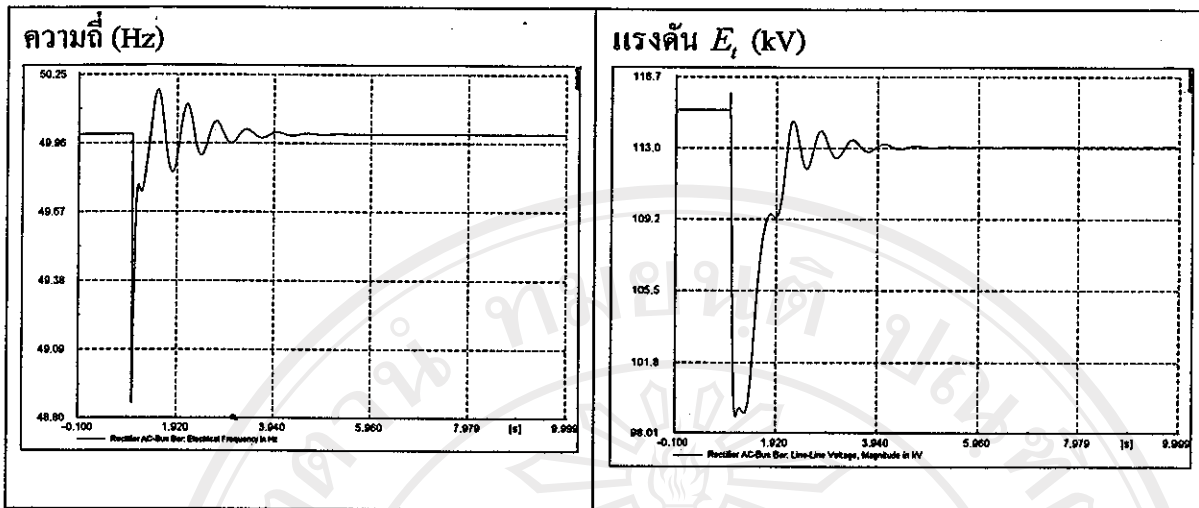
รูปที่ 3.17 (ต่อ) ผลกระทบต่อระบบ HVDC เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC

การเปลี่ยนแปลงในระบบ AC จะแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้า, มุมโรเตอร์, ความถี่ และแรงดัน ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบ



รูปที่ 3.18 ผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC

All rights reserved



รูปที่ 3.18 (ต่อ) ผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC

จากรูปที่ 3.17 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบ HVDC จะเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อเวลาผ่านไป 3.73 วินาที ซึ่งการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงดัน DC ในระบบลดลง จึงต้องมีการปรับค่าแทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มค่าแรงดัน DC ให้กลับมามีค่าคงที่เหมือนเดิม โดยจะใช้เวลา 4.17 วินาที แรงดันจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้ง

การเปลี่ยนแปลงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากการติดตั้งตัว AVR และ ตัวบังคับ ซึ่งจะคอยควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า, ความเร็ว และ แรงดัน ในตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 5.82 วินาที

จากรูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบ HVDC จะส่งผลให้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้น เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ระบบ HVDC ใช้ในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า ซึ่งการที่กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้แรงดันบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต้อมีค่าลดลงด้วย สามารถแก้ปัญหาแรงดันที่ตกลงไป ด้วยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุแบบขนาน (Shunt Capacitors) เข้าที่บัสเชื่อมต่อกับระบบ HVDC

ส่วนความถี่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงก่อนที่จะตัวบังคับมาปรับเพิ่มความถี่ขึ้นจนมีค่ากลับมาคงที่ เนื่องมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงมากขึ้นในช่วงที่เพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC

การที่ระบบจะมีเสถียรภาพหรือเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ไวหรือช้า ขึ้นอยู่กับการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในอุปกรณ์ควบคุมที่ติดตั้งในระบบ ถ้าสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ได้เหมาะสมแล้ว ระบบควบคุมจะสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบได้ดี ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้น