

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.1.1 พื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เป็นเครื่องกลจักรไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่ง ซึ่งภายใต้การทำงานสภาวะคงตัว (Steady State) ความเร็วของเครื่องกลจักรไฟฟ้าชนิดนี้จะมีค่าคงที่ โดยเป็นสัดส่วนกับความถี่ไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดอาร์เมเจอร์ จะหมุนไปด้วยความเร็วเดียวกันกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดสนาม ความเร็วนี้เรียกว่า “ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)” ดังสมการ (2.1) โดยการใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรเตอร์จะต้องหมุนด้วยความเร็วคงที่ เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าจ่ายออกมีความถี่ไฟฟ้าคงที่

$$n = \frac{120f}{p_f} \quad (2.1)$$

โดยที่	n	คือ	ความเร็วซิงโครนัส (รอบต่อนาที)
	f	คือ	ความถี่ไฟฟ้า (เฮิรตซ์)
	p_f	คือ	จำนวนขั้วแม่เหล็ก

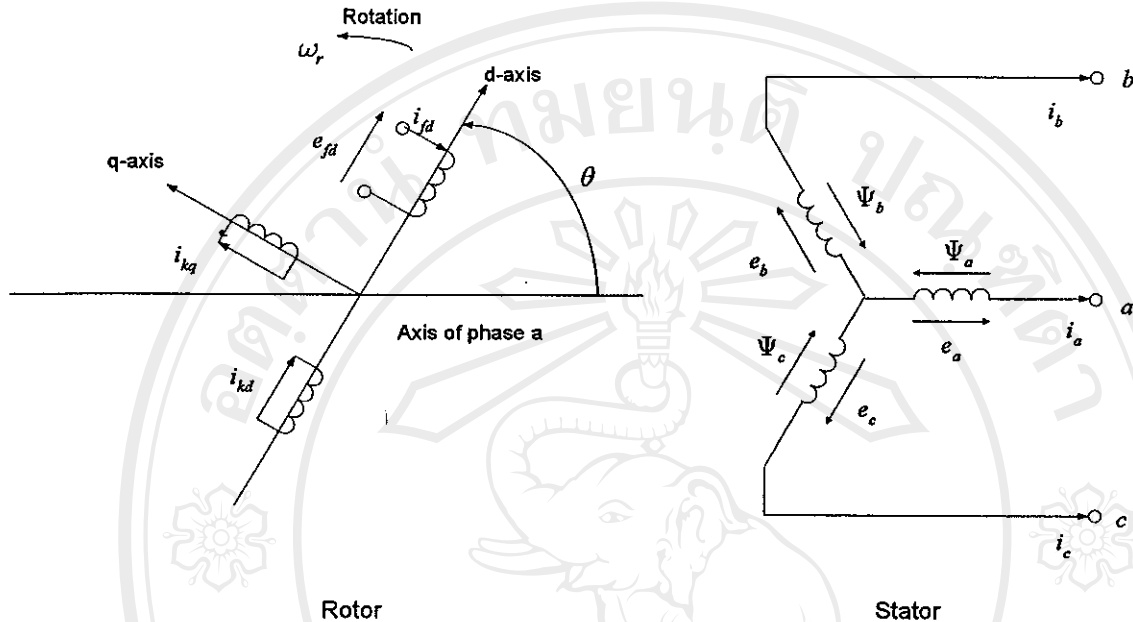
2.1.2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาดใหญ่จะเป็นแบบสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field Machine) โดยแบ่งเป็นสองส่วน คือ

2.1.2.1 สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วยขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) คอยทำหน้าที่ส่งพลังงานไฟฟ้าออกไปภายนอก

2.1.2.2 โรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่มีการหมุน ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก, ขดลวดสนาม (Field Winding) และชุดขดลวดหน่วง (Damper Winding) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ด้านสเตเตอร์

วงจรสเตเตอร์และโรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยวงจรสเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวดอาร์มเจอร์ทำมุมต่างกัน 120° สร้างกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ส่วนวงจรโรเตอร์ ประกอบด้วยแกนสองแกน ได้แก่ แกน d และแกน q โดยแกน q จะตั้งฉากกับแกน d (มุมเฟสนำหน้าแกน d อยู่ 90°)



รูปที่ 2.1 วงจรสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

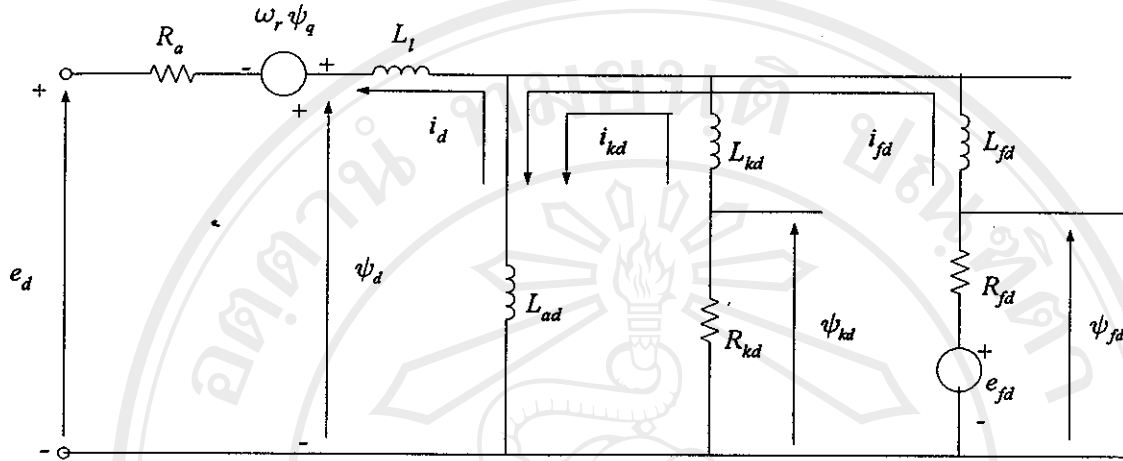
จากรูปที่ 2.1	a, b, c คือ	เฟสของขดลวดสเตเตอร์
	fd คือ	ขดลวดสนาม
	kd คือ	ขดลวดหน่วงในแกน d
	kq คือ	ขดลวดหน่วงในแกน q
	θ คือ	มุมที่แกน d นำหน้าขดลวดสเตเตอร์เฟส a (เรเดียนทางไฟฟ้า)
	ω_r คือ	ความเร็วโรเตอร์ ($\frac{d\theta}{dt}$, เรเดียนทางไฟฟ้า ต่อ วินาที)

หมายเหตุ kd, kq มีจำนวน $1, 2, \dots, n$; โดยที่ n คือ จำนวนวงจรหน่วง (Damper Circuit)

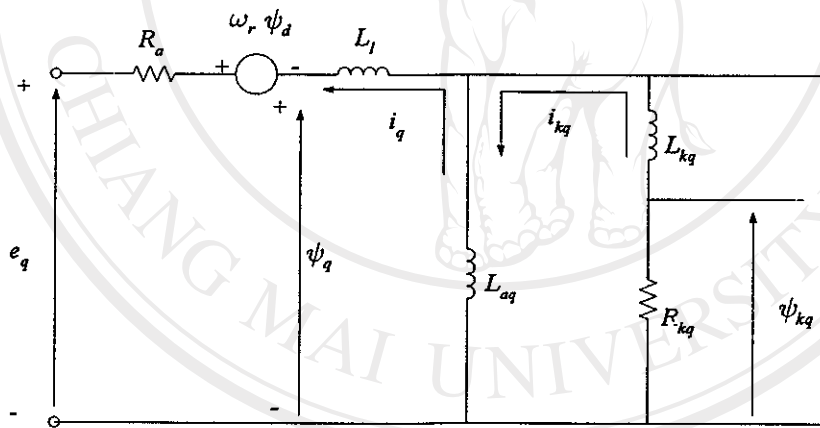
เนื่องจากวงจรสเตเตอร์เป็นวงจร 3 เฟส (abc) ส่วนวงจรโรเตอร์เป็นวงจร 2 เฟส (dq) การแปลงปริมาณทาง 3 เฟส เป็น ปริมาณทาง 2 เฟส และ การแปลงปริมาณทาง 2 เฟส เป็น ปริมาณทาง 3 เฟส สามารถทำได้โดยใช้การแปลงของปาร์ก (Park's Transform) [4]

2.1.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

วงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แบ่งออกเป็น 2 วงจร ได้แก่ วงจรสมมูลแกน d และ วงจรสมมูลแกน q แสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลแกน d



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลแกน q

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2 และ 2.3 สามารถเขียนสมการต่างๆในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ได้ดังนี้

สมการไฟฟ้าด้านสเตเตอร์

$$e_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q - R_a i_d \quad (2.2)$$

$$e_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d - R_a i_q \quad (2.3)$$

สมการไฟฟ้าด้านโรเตอร์

$$e_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_{fd}i_{fd} \quad (2.4)$$

$$0 = \frac{d\psi_{kd}}{dt} + R_{kd}i_{kd} \quad (2.5)$$

$$0 = \frac{d\psi_{kq}}{dt} + R_{kq}i_{kq} \quad (2.6)$$

สมการเส้นแรงแม่เหล็กแกน d

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{kd} \quad (2.7)$$

$$\psi_{fd} = L_{ad} i_d + L_{fd} i_{fd} + L_{ad} i_{kd} \quad (2.8)$$

$$\psi_{kd} = L_{ad} i_d + L_{fd} i_{fd} + L_{kd} i_{kd} \quad (2.9)$$

สมการเส้นแรงแม่เหล็กแกน q

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{aq} i_{kq} \quad (2.10)$$

$$\psi_{kq} = L_{aq} i_q + L_{kq} i_{kq} \quad (2.11)$$

สมการแรงบิดไฟฟ้า

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (2.12)$$

สมการการแกว่ง

$$\frac{2H}{\omega_o} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e - \frac{K_D}{\omega_o} \frac{d\delta}{dt} \quad (2.13)$$

เมื่อ e_d, e_q คือ แรงดันในแกน d และ q ของแรงดันที่ขั้วขดลวดสเตเตอร์

e_{fd} คือ แรงดันที่ขั้วของขดลวดสนาม

ψ_d, ψ_q คือ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าในแกน d และ q ของขดลวดสเตเตอร์

ψ_{fd} คือ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าในขดลวดสนาม

ψ_{kd}, ψ_{kq} คือ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าในแกน d และ q ของขดลวดหน่วง

i_d, i_q	คือ	กระแสในแกน d และ q ของกระแสเตเตอร์
i_{fd}	คือ	กระแสในขดลวดสนาม
i_{kd}, i_{kq}	คือ	กระแสในแกน d และ q ของขดลวดหน่วง

R_a	คือ	ความต้านทานขดลวดอาร์มเจอร์
R_{fd}	คือ	ความต้านทานขดลวดสนาม
R_{kd}, R_{kq}	คือ	ความต้านทานในแกน d และ q ของขดลวดหน่วง

L_a	คือ	ความเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์
L_d, L_q	คือ	ความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self – Inductance) ในแกน d และ q ของขดลวดอาร์มเจอร์

L_{ad}, L_{aq}	คือ	ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual – Inductance) ในแกน d และ q ของขดลวดหน่วง
------------------	-----	---

L_{fd}	คือ	ความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดสนาม
L_{kd}, L_{kq}	คือ	ความเหนี่ยวนำตัวเองในแกน d และ q ของขดลวดหน่วง

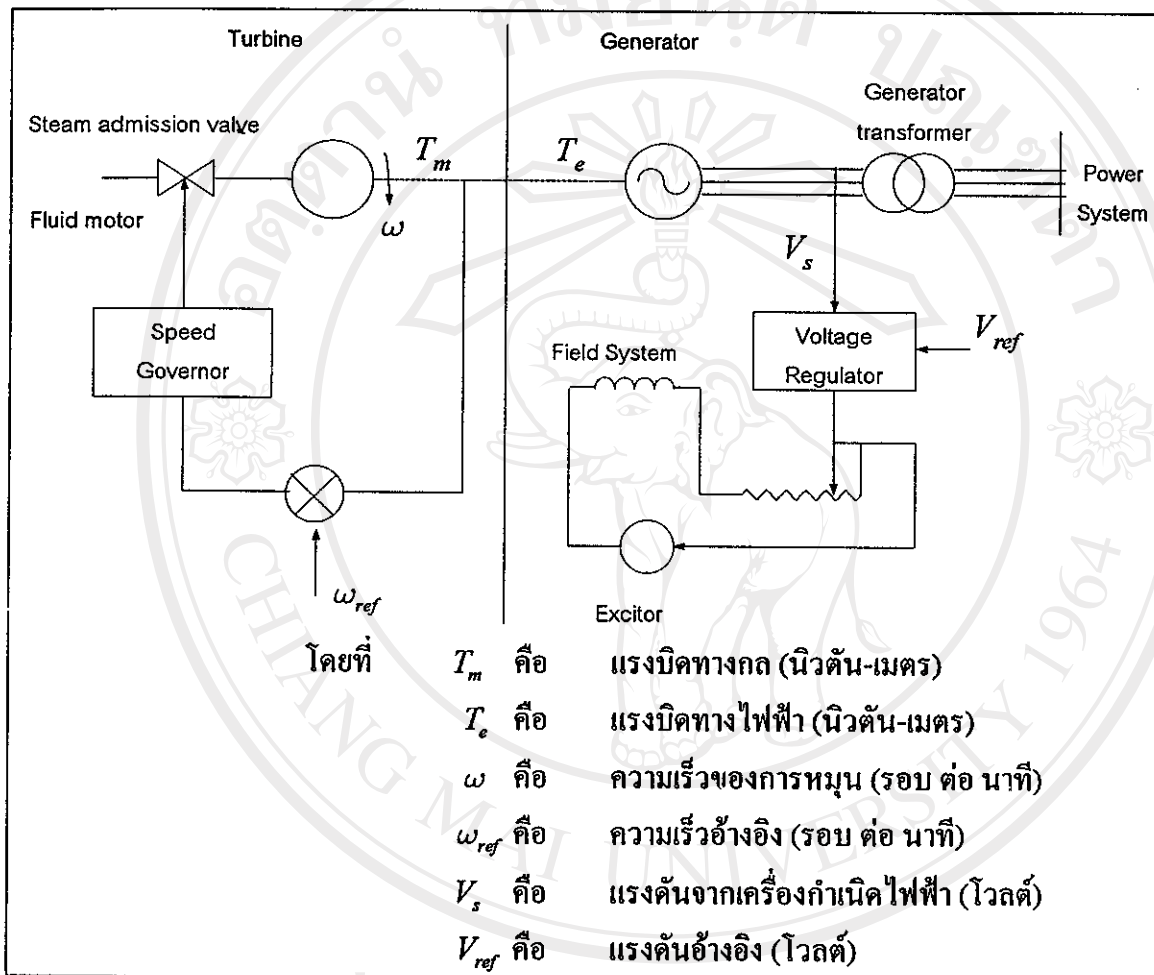
δ	คือ	มุมระหว่างแกน d และแกนอ้างอิงการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส
ω_o	คือ	ความเร็วเชิงโคโรนัส
H	คือ	ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
K_D	คือ	ตัวประกอบการหน่วง (Damping Factor)
T_m	คือ	แรงบิดทางกล (นิวตัน-เมตร)
T_e	คือ	แรงบิดทางไฟฟ้า (นิวตัน-เมตร)

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีตัวหน่วง สมการที่ (2.5), (2.6), (2.9) และ (2.11) จะหายไป และในสมการที่ (2.7), (2.8) และ (2.10) เทอมที่มี i_{kd} และ i_{kq} จะถูกตัดไป

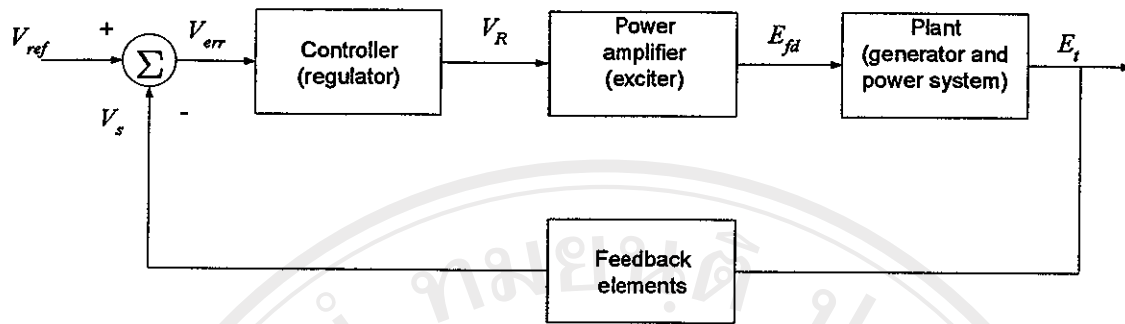
2.1.4 อุปกรณ์ควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัส

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยระบบควบคุม 2 ชนิด คือ ตัวคุมค่าแรงดันแบบอัตโนมัติ (Auto Voltage Regulator, AVR) จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ ส่วนอีกตัวคือ ตัวบังคับ (Governor) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้มีความถี่คงที่

รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังไอน้ำพร้อมอุปกรณ์ควบคุม ประกอบด้วย ตัว AVR และ ตัวบังคับ โดย AVR จะทำงานโดยรับค่าแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง แล้วนำค่าความผิดพลาด (error) มาเข้าระบบกระตุ้น (Excitation System) เพื่อปรับค่าแรงดันที่ขดลวดสนาม (e_{fd}) แสดงการทำงานในรูป 2.5



รูปที่ 2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงคอนัสกังหันไอน้ำ พร้อมอุปกรณ์ควบคุม



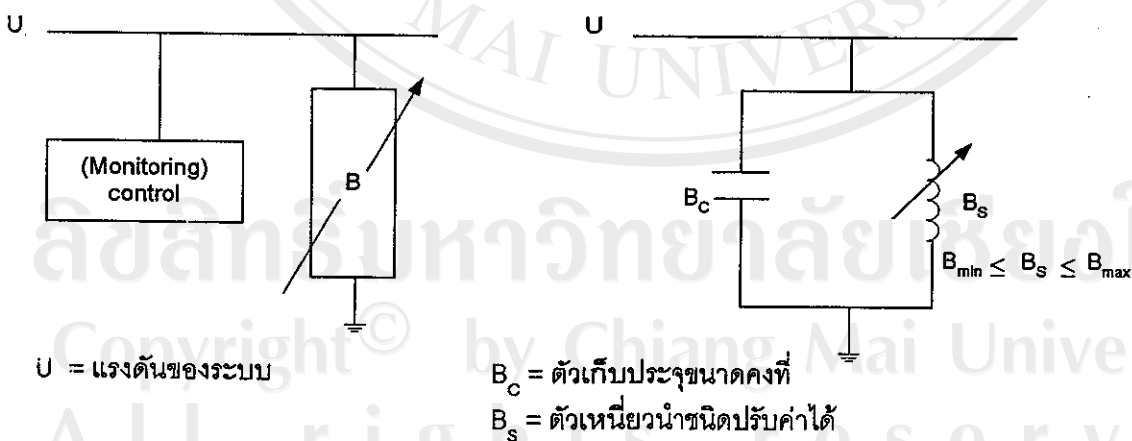
รูปที่ 2.5 รูปแบบการควบคุมของตัว AVR

ตัวบังคับในรูปที่ 2.4 เป็นตัวบังคับของระบบที่ใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อน โดยจะนำค่าความเร็วที่ได้จากกังหันมาเปรียบเทียบกับความเร็วอ้างอิง นำค่าความผิดพลาดมาปรับการทำงานของวาล์วส่งผ่านไอน้ำ เพื่อปรับค่าความเร็วของกังหัน

ลักษณะตัวบังคับจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนกังหัน อันได้แก่ กังหันไอน้ำ, กังหันก๊าซ, กังหันน้ำ, กังหันดีเซล และ กังหันลม เป็นต้น

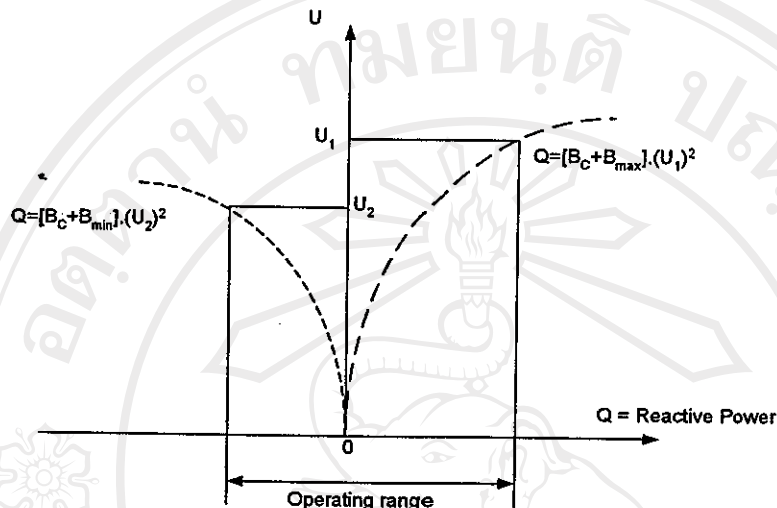
2.2 ตัวชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต (Static Var Compensator : SVC)

อุปกรณ์ SVC ใช้สำหรับชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียไปในระบบ อันเนื่องจากสาเหตุต่างๆ มีรูปแบบวงจรแสดงในรูปที่ 2.6



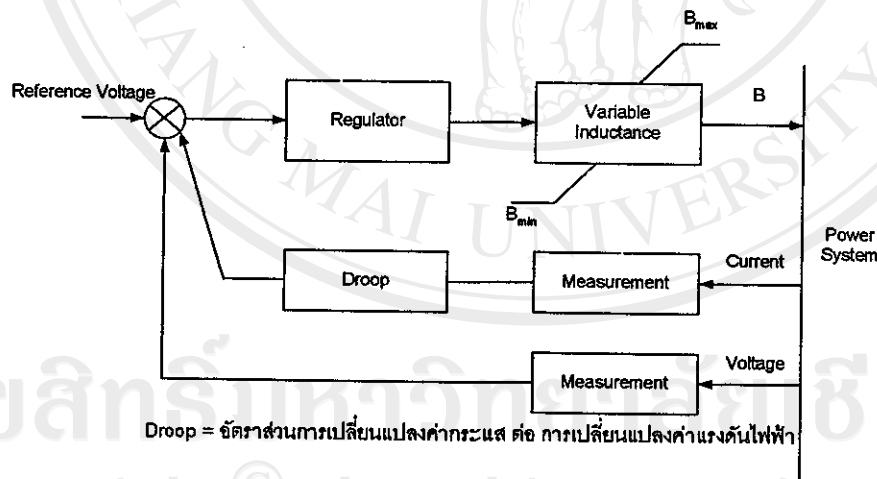
รูปที่ 2.6 วงจรทั่วไปของอุปกรณ์ SVC

จากรูปที่ 2.6 วงจรของอุปกรณ์ SVC เป็นวงจรรีแอคแตนซ์แบบปรับค่าได้ ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้ (แทนด้วยซัสเซปแทนซ์ B_c) สามารถปรับค่าได้ระหว่างค่า B_{min} ถึง B_{max} ต่อขนานกับตัวเก็บประจุขนาดคงที่ (แทนด้วยซัสเซปแทนซ์ B_c) มีลักษณะการทำงานแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ SVC ในระนาบ U – Q

การควบคุมของตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้ มีลักษณะการทำงานแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การทำงานของตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้ ในวงจรของ SVC

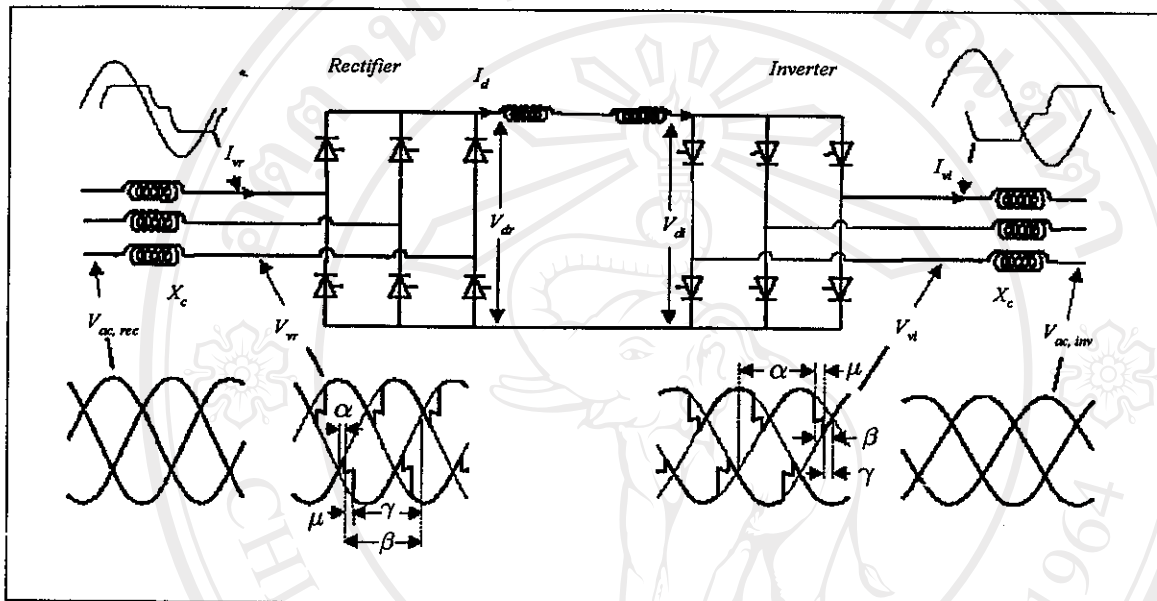
2.3 ระบบเอชวีดีซี (High Voltage Direct Current System, HVDC)

2.3.1 พื้นฐานเกี่ยวกับระบบเอชวีดีซี

ระบบ HVDC เป็นระบบการส่งผ่านพลังงานโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการนำพลังงานจากระบบ AC มาเปลี่ยนเป็นพลังงาน DC แปลงโดยใช้อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ในสถานีคอนเวอร์-

เตอร์ พลังงาน DC ที่แปลงแล้วจะถูกส่งผ่านด้วยสายส่ง DC จากนั้นจะเปลี่ยนกลับเป็นพลังงาน AC ที่สถานีคอนเวอร์เตอร์ที่ตั้งอยู่อีกด้านหนึ่ง

คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เปลี่ยนพลังงานจากระบบ AC เป็น DC เรียกว่า เรกติไฟเออร์ (Rectifier) และคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เปลี่ยนพลังงานจากระบบ DC เป็น AC เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) รูปวงจรระบบ HVDC แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรระบบ HVDC พร้อมรูปคลื่นแรงดันและกระแส [6]

จากรูปที่ 2.9	V_{dr}	คือ	แรงดัน DC ด้านเรกติไฟเออร์
	V_{di}	คือ	แรงดัน DC ด้านอินเวอร์เตอร์
	$V_{ac,rec}$	คือ	แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ด้านเรกติไฟเออร์
	$V_{ac,inv}$	คือ	แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ด้านอินเวอร์เตอร์
	V_{vr}, V_{vi}	คือ	แรงดันที่วาล์วคอนเวอร์เตอร์ด้าน เรกติไฟเออร์ และ อินเวอร์เตอร์
	i_{vr}, i_{vi}	คือ	กระแสที่วาล์วคอนเวอร์เตอร์ด้าน เรกติไฟเออร์ และ อินเวอร์เตอร์
	I_d	คือ	ไฟกระแสตรง
	X_c	คือ	รีแอ็กแตนซ์การสับเปลี่ยน (Commutation Reactance)

α	คือ	มุมประวิง (Delay Angle)
μ	คือ	มุมเหลื่อม (Overlap Angle)
β	คือ	มุมแอดวานซ์ (Advance Angle) มีค่าเท่ากับ $(\alpha + \mu)$
γ	คือ	มุมดับ (Extinction Angle) มีค่าเท่ากับ $[180^\circ - \beta]$

แรงดันด้านเรกติไฟเออร์ และด้านอินเวอร์เตอร์ [2] มีค่าดังนี้

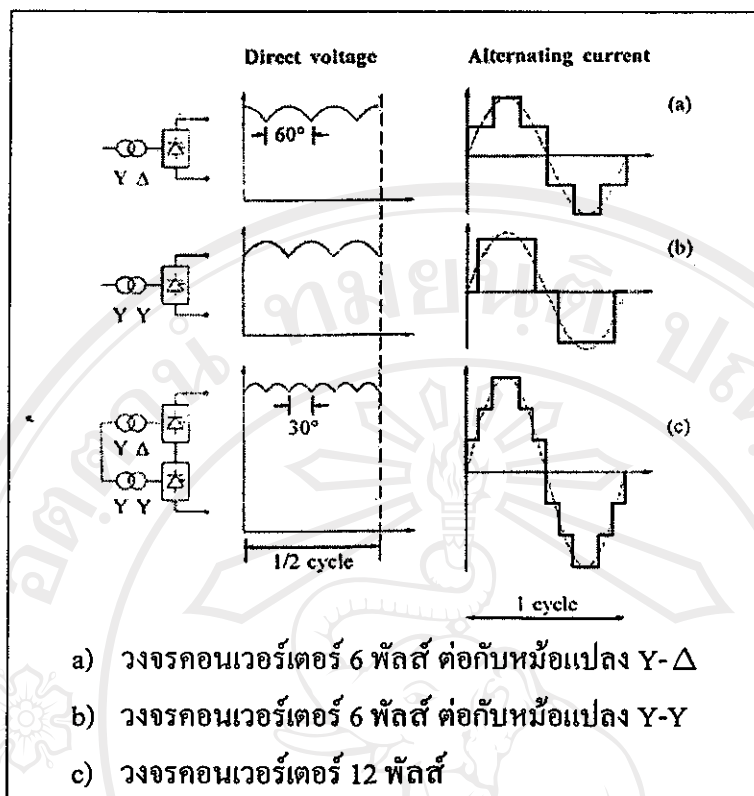
ด้านเรกติไฟเออร์

$$V_{dr} = 1.35V_{ac,rec} \cos \alpha - \frac{3X_c I_d}{\pi} \quad (2.14)$$

ด้านอินเวอร์เตอร์

$$V_{di} = 1.35V_{ac,inv} \cos \gamma - \frac{3X_c I_d}{\pi} \quad (2.15)$$

รูปที่ 2.9 เป็นระบบ HVDC แบบ 6 พัลส์ มีความหมายว่า 1 คาบของแรงดัน AC ระบบ HVDC สามารถสร้างแรงดัน DC ได้ 6 พัลส์ ส่วนรูปที่ 2.10 เป็นระบบ HVDC แบบ 12 โดยระบบจะประกอบด้วยตัวคอนเวอร์เตอร์จำนวน 2 ชุด โดยหม้อแปลงที่ต่อกับคอนเวอร์เตอร์ จะมีการต่อขดลวดไม่เหมือนกัน (ต่อแบบ Y-Y กับแบบ Y- Δ) ทั้งนี้ก็เพื่อให้แรงดัน DC ที่ออกมาจากคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุด ทำมุมเฟสต่างกัน 30° เมื่อรวมแรงดัน DC ที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุด จะได้แรงดัน DC จำนวน 12 พัลส์ ต่อ 1 คาบของแรงดัน AC ส่งผลให้แรงดัน DC กระเพื่อมน้อยกว่ากรณีเป็นระบบแบบ 6 พัลส์



รูปที่ 2.10 ระบบ HVDC แบบ 12 พัลส์ พร้อมรูปคลื่นแรงดัน DC และกระแส AC

จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 แรงดันด้านเรกติไฟเออร์และแรงดันด้านอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC แบบ 12 พัลส์ มีค่าดังนี้

ด้านเรกติไฟเออร์

$$V_{dr} = 1.35BV_{ac,rec} \cos \alpha - \frac{3X_c B I_d}{\pi} \quad (2.16)$$

ด้านอินเวอร์เตอร์

$$V_{di} = 1.35BV_{ac,inv} \cos \gamma - \frac{3X_c B I_d}{\pi} \quad (2.17)$$

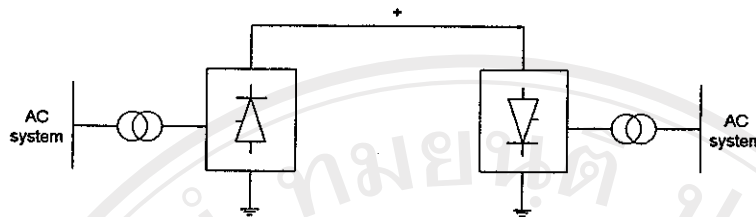
เมื่อ B คือ จำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ (สำหรับวงจร 12 พัลส์ $B=2$)

2.3.2 ชนิดการเชื่อมต่อระบบ HVDC

การเชื่อมต่อระบบ HVDC สามารถจำแนกได้ 3 ชนิด ดังนี้

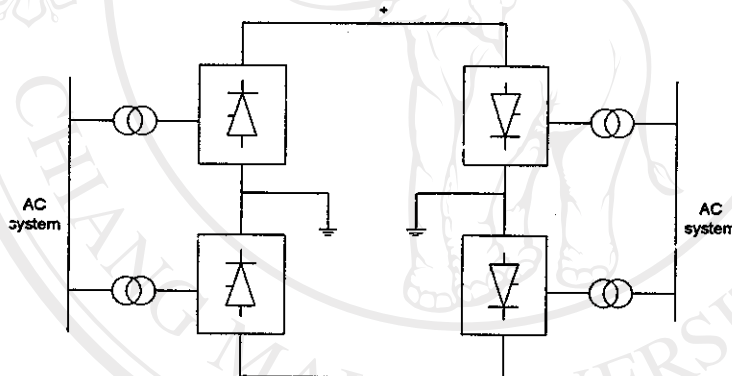
1. การเชื่อมต่อแบบ โมโนโพลาร์ (Monopolar Link) มีลักษณะแสดงในรูปที่ 2.11 เป็น

การเชื่อมต่อโดยใช้ตัวนำ 1 เส้น และใช้ดินหรือน้ำทะเลเป็นตัวนำกลับ เป็นแบบที่ง่ายและราคาถูกที่สุด



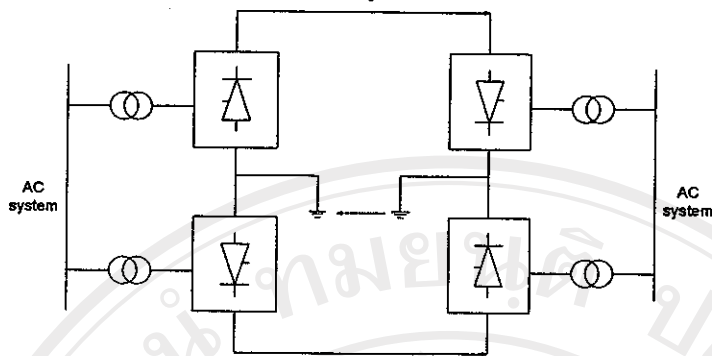
รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่อแบบโมโนโพลาร์

2. การเชื่อมต่อแบบไบโพลาร์ (Bipolar Link) มีลักษณะแสดงในรูป 2.12 เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้ตัวนำ 2 เส้น เป็นขั้วบวกและขั้วลบ ที่ปลายแต่ละด้านมีคอนเวอร์เตอร์จำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกันอยู่ โดยมีพิกัดแรงดันเท่ากันทั้งสองตัว จุดนิวทรัลอาจมีอยู่ที่ด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน ถ้าต่อนิวทรัลทั้งสองด้านจะทำให้ขั้วทั้งสองทำงานโดยอิสระไม่ขึ้นต่อกัน เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่ตัวนำเส้นใดเส้นหนึ่ง ตัวนำเส้นที่เหลือก็ยังสามารถจ่ายโหลดได้ครึ่งหนึ่งของพิกัดโหลด



รูปที่ 2.12 การเชื่อมต่อแบบไบโพลาร์

3. การเชื่อมต่อแบบโฮโมโพลาร์ (Homopolar Link) มีลักษณะแสดงในรูป 2.13 เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้ตัวนำ 2 เส้นหรือมากกว่า และทั้งหมดเป็นขั้วเดียวกัน ซึ่งปกติจะเป็นขั้วลบ และมีกราวด์เป็นตัวนำกลับเสมอ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตัวนำเส้นใดเส้นหนึ่ง ระบบจะสามารถจ่ายโหลดได้มากกว่าครึ่งหนึ่งของพิกัดโหลด

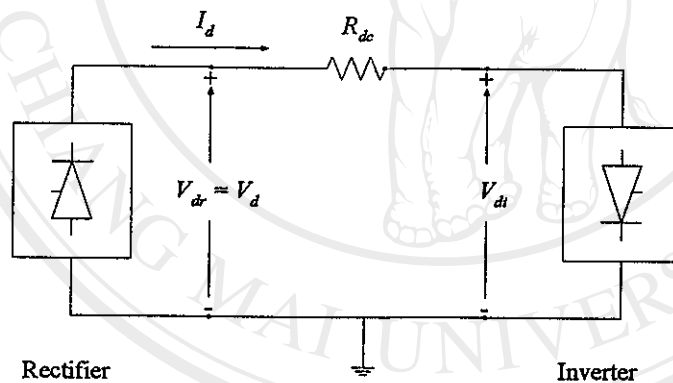


รูปที่ 2.13 การเชื่อมต่อแบบโฮโมโพลาร์

2.3.3 การควบคุมระบบ HVDC

2.3.3.1 การควบคุมทั่วไป

การควบคุมการทำงานของระบบ HVDC สามารถอธิบายได้จากระบบ HVDC แบบ 1 ขั้ว แสดงในรูปที่ 2.14 ขั้วที่ใช้ในการส่งพลังงานคือขั้วบวก แรงดัน DC (V_d) คือ แรงดันด้านเรกติไฟเออร์



รูปที่ 2.14 ระบบ HVDC เพื่อแสดงการควบคุม

กระแส DC (I_d) หาได้จาก

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_{dc}} \quad (2.18)$$

เมื่อ R_{dc} คือ ความต้านทานในสายส่ง DC

ในการควบคุมจะให้คอนเวอร์เตอร์ตัวหนึ่งควบคุมแรงดันในสายส่ง ส่วนอีกตัวจะควบคุมค่ากระแส I_d โดยที่คอนเวอร์เตอร์ด้านอินเวอร์เตอร์จะทำงานโดยบังคับให้มุม γ มีค่าคงที่

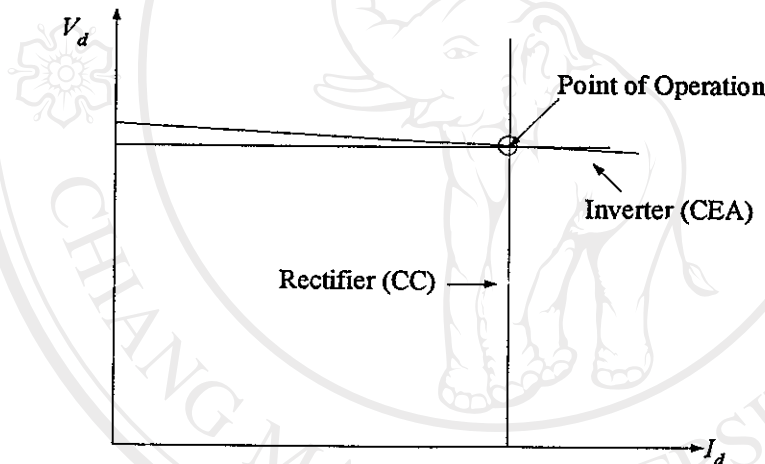
(Constant Extinction Angle : CEA) เพื่อควบคุมแรงดัน DC (V_d) ส่วนคอนเวอร์เตอร์ด้านเรกติไฟเออร์จะควบคุมกระแส I_d (Current Control : CC) ซึ่งเป็นการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

จากสมการที่ 2.17 แรงดัน DC (V_d) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_d &= \left(1.35BV_{ac,inv} \cos \gamma - \frac{3X_cBI_d}{\pi} \right) + R_{dc}I_d \\ &= 1.35BV_{ac,inv} \cos \gamma - \left(\frac{3X_cB}{\pi} - R_{dc} \right) I_d \end{aligned} \quad (2.19)$$

รูปแบบการควบคุม สามารถแสดงได้จากกราฟแรงดัน - กระแส ($V-I$) แสดงในรูปที่

2.15



รูปที่ 2.15 กราฟแรงดัน - กระแส แสดงการควบคุมของระบบ HVDC

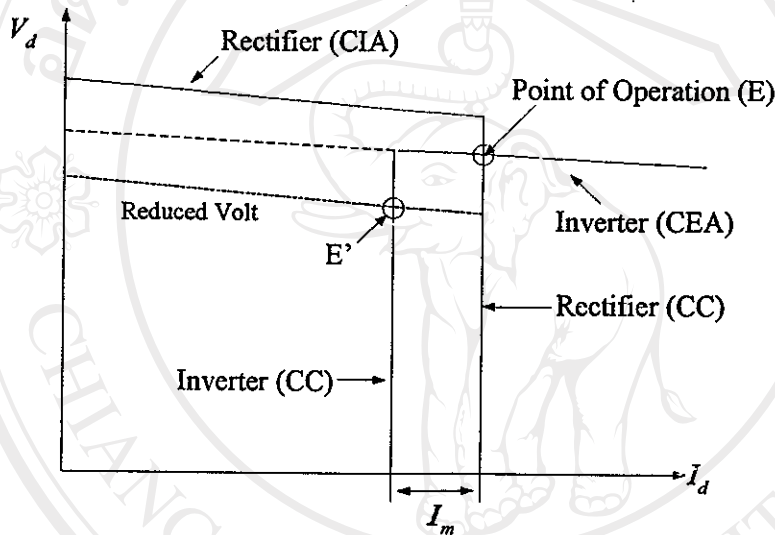
จากสมการที่ 2.19 ถ้าเทอม $\frac{3X_cB}{\pi}$ มีค่ามากกว่า R_{dc} จะเกิดแรงดันตก ส่งผลให้กราฟการควบคุมด้านอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.15 จะมีความชันเป็นลบ และมีจุดทำงานของระบบ อยู่ที่จุดตัดของเส้นกราฟการควบคุมด้านอินเวอร์เตอร์และด้านเรกติไฟเออร์

การควบคุมกระแสด้านเรกติไฟเออร์ จะทำโดยการปรับค่ามุม α ถ้ากระแสในระบบน้อยกว่าค่ากระแสที่ต้องการ (Current order : I_{ord}) ก็จะทำให้การเพิ่มกระแสขึ้น โดยการลดขนาดมุม α

การควบคุมด้านอินเวอร์เตอร์ เป็นการควบคุมมุม γ คงที่ ดังนั้นการควบคุมแรงดัน V_d จะใช้วิธีการปรับแทป (Tap) ของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ เพื่อปรับค่าแรงดัน $V_{ac,inv}$ ในสมการที่ 2.17 แต่การปรับแทปของหม้อแปลงด้านอินเวอร์เตอร์จะทำให้ ค่าแรงดันด้านเรกติไฟเออร์ (V_d) เปลี่ยน

ไปด้วย จึงต้องมีการปรับแก้ของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ด้านเรกติไฟเออร์ เพื่อให้มุม α มีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ (ประมาณ 10° - 20°)

ในทางปฏิบัติ การควบคุมด้านเรกติไฟเออร์ จะควบคุมโดยการเปลี่ยนค่ามุม α โดยมุม α จะต้องไม่มีค่าน้อยกว่าค่ามุม α ต่ำสุด ($\alpha_{\min}$) ซึ่งในการควบคุมแรงดันที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นเกินแรงดันที่จุด $\alpha_{\min}$ โดยช่วงที่กระแส I_d น้อยกว่า I_{ord} เรกติไฟเออร์จะทำงานที่มุม α เท่ากับ $\alpha_{\min}$ เพื่อปรับค่ากระแส I_d ให้เท่ากับ I_{ord} เป็นการควบคุมแบบมุมจุดชนวนคงที่ (Constant Ignition Angle : CIA) เมื่อกระแส I_d เท่ากับ I_{ord} แล้ว เรกติไฟเออร์จะเปลี่ยนการควบคุมเป็นแบบควบคุมกระแส (CC) แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟแรงดัน - กระแส แสดงการควบคุมของระบบ HVDC ในทางปฏิบัติ

การควบคุมด้านอินเวอร์เตอร์ ถ้าทำงานควบคุมแบบ CEA อย่างเดียว จะไม่สามารถหาจุดทำงานในกรณีที่แรงดันด้านเรกติไฟเออร์มีค่าลดลง (เช่น Reduce Volt) ส่งผลให้กระแสและกำลังไฟฟ้าลดลงมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ระบบหยุดทำงาน

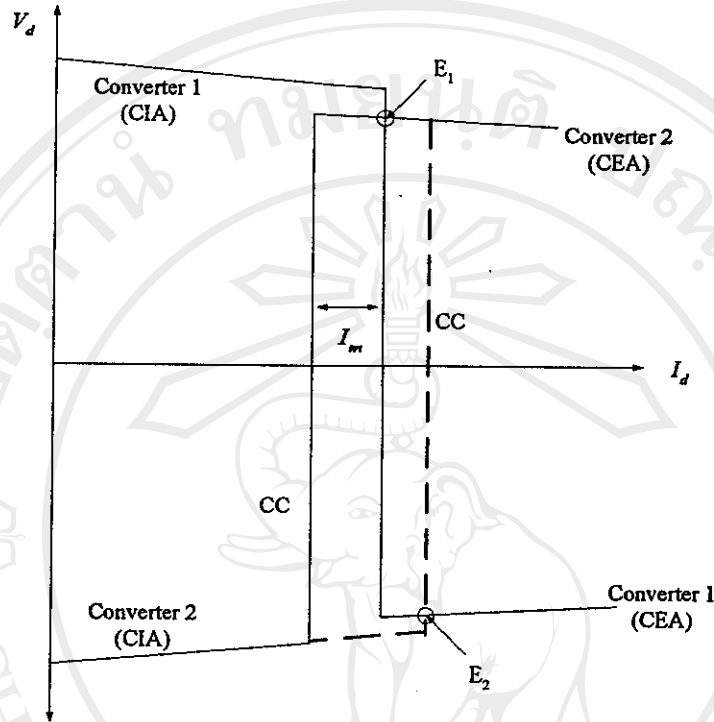
เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว การควบคุมด้านอินเวอร์เตอร์จะมีการควบคุมแบบ CC โดยตั้งค่ากระแสที่ต้องการให้มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสที่ต้องการของด้านเรกติไฟเออร์

ผลต่างกระแสที่ต้องการของด้านเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์ เรียกว่า กระแสส่วนเผื่อ (Current Margin, I_m) มีค่าประมาณ 10 % ถึง 15 % ของขนาดกระแสพิกัด

เพราะฉะนั้นเมื่อแรงดันด้านเรกติไฟเออร์มีค่าลดลง การควบคุมด้านอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนเป็นแบบ CC เพื่อให้เกิดจุดทำงานที่จุด E' และทำให้ระบบยังสามารถทำงานต่อไปได้

2.3.3.2 การควบคุมเพื่อเปลี่ยนทิศการไหลของกำลังไฟฟ้า

โดยปกติคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้เป็นทั้งเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์ จึงมีลักษณะการควบคุมแสดงได้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถเป็นทั้งเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.17 กำลังไฟฟ้าไหลจากคอนเวอร์เตอร์ 1 ไปคอนเวอร์เตอร์ 2 จะมีจุดทำงานที่จุด E_1 แต่ถ้าต้องการให้กำลังไฟฟ้าไหลจากคอนเวอร์เตอร์ 2 ไป คอนเวอร์เตอร์ สามารถทำได้โดยตั้งค่ากระแส I_m ใหม่ ให้กระแสที่ต้องการของตัวคอนเวอร์เตอร์ 2 มากกว่าของตัวคอนเวอร์เตอร์ 1 (แสดงเป็นเส้นประ) จุดทำงานจะย้ายเป็นจุด E_2 โดยกระแส I_d ยังมีทิศทางเดิม แต่แรงดันจะเปลี่ยนเป็นค่าลบ

2.4 ความแข็งแรงของระบบ (System Strength)

ปัญหาด้านเสถียรภาพที่เกิดขึ้นในระบบ AC/DC ส่วนใหญ่ เกิดจากความไม่แข็งแรงของระบบ AC (Weak AC System) โดยสาเหตุที่ทำให้ระบบไม่แข็งแรงเกิดจาก [4]

1. ค่าอิมพีแดนซ์ในระบบ AC มีค่าสูง
2. ค่าความเฉื่อย (Inertia) ของเครื่องกลจักรไฟฟ้าในระบบ AC มีค่าต่ำ

2.4.1 Effective Short – Circuit Ratio (ESCR)

เป็นดัชนีที่ใช้วัดความแข็งแรงของระบบ ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ DC มีการรวมผล
กระทบจากอุปกรณ์ที่ต่อเชื่อมเข้ามา ได้แก่ วงจรกรอง, ตัวเก็บประจุ, ชิงโครนิส คอนเดนเซอร์
 เป็นต้น

ค่า ESCR คำนวณได้จาก

$$ESCR = \frac{\text{Short Circuit MVA} - \text{MVA of filters and capacitors}}{\text{HVDC MW rating}} \quad (2.20)$$

โดยที่	Short Circuit MVA	คือ	กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (MVA)
	MVA of filters and capacitors	คือ	ขนาดของตัวกรองและตัวเก็บประจุที่ต่อกับ ระบบ HVDC
	HVDC MW rating	คือ	กำลังไฟฟ้าฟีดของ HVDC

สามารถจำแนกความแข็งแรงของระบบ AC/DC โดยใช้ค่าดัชนี ESCR [4][5] ได้ดังนี้

- ESCR > 5 ระบบมีความแข็งแรง
- ESCR ระหว่าง 3 ถึง 5 ระบบมีความแข็งแรงน้อย
- ESCR < 3 ระบบมีความแข็งแรงน้อยมาก