บทที่ 3

ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (เอชวีดีซี)

3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเอชวีดีซี [7]

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้นครั้งแรกจากการคิดค้นของโทมัส อัลวา เอดิสัน เป็นการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ภายหลังจากการประดิษฐ์หม้อแปลงไฟฟ้ารวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำในต้นศตวรรษที่ 20 ทำให้เกิดการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นเพื่อนแทนที่การส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเดิม เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันต่ำไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกลๆ ได้ อย่างไรก็ตาม หลังจากการพัฒนาวาล์วแรงดันสูง (high voltage valve) ขึ้นในปี ค.ศ.1929 ทำให้เกิดการทดลองนำวาล์วแรงดันสูงมาใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันสูง ในปี ค.ศ. 1936 ได้มีการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 5.25 MW ผ่านสายส่งความยาว 27 km ที่ระดับแรงดัน 30 kV ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยในหลายๆ ประเทศก็ได้มีการใช้เอชวีดีซีกันอย่างแพร่หลายยกตัวอย่างเช่น

ที่เมือง Itaipu ประเทศบราซิลได้มีการใช้เอชวีดีซีในการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz เข้ากับระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ 60 Hz เข้าด้วยกัน และเป็นการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ (6,300 MW) และมีระยะทางที่ไกล (800 km)

โครงการ Leyton-Luzon ประเทศฟิลิปปินส์ได้ใช้เอชวีดีซีในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างเกาะ และเพื่อเพิ่มพูนเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับของเมือง Manila

โครงการ Rihand-Delhi ประเทศอินเดียได้ใช้เอชวีดีซีในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ (1,500 MW) เข้าสู่เมือง Dehli เพื่อที่จะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ และเพิ่มเสถียรภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น

ใน Garabi โครงการ Independent Transmission Project (ITP) ได้มีการใช้ เอชวีดีซี ประเภท back to back เพื่อเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าประเทศอาร์เจนตินาที่มีความถี่ 50 Hz ไปยังระบบไฟฟ้าของประเทศบราซิลที่มีความถี่ 60 Hz

ใน Gotland ประเทศสวีเดนได้มีการใช้เอชวีดีซีในการเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้าพลังงานลมไปยังระบบไฟฟ้าหลัก เพื่อเพิ่มคุณภาพให้แก่ระบบไฟฟ้าโดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อม ณ บริเวณที่ติดตั้งเอชวีดีซี

ใน Queensland ประเทศออสเตรเลีย ได้ใช้เอชวีดีซีเพื่อเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของ New South Wales กับ Queensland เข้าด้วยกัน เพื่อการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของทั้งสองระบบและยังสามารถกำหนดทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย

ข้อดีของเอชวีดีซี

1) สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2) สามารถเชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีความถี่แตกต่างกันได้
3) ในการส่งกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกล การส่งด้วยไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ
4) มีความเหมาะสมมากกว่าในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายเคเบิ้ลใต้น้ำ และใต้ดินในระยะทางไกล เนื่องจากการส่งผ่านสายเคเบิ้ลใต้น้ำ และใต้ดินของไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาค่าคาปาซิทีฟ
5) ไม่เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพ
6) ส่งผลรบกวนต่อสัญญาณวิทยุต่ำกว่าระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
7) เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น จะไม่ส่งผ่านกระแสลัดวงจรข้ามไปยังระบบอื่น

ข้อเสียของเอชวีดีซี

1) คอนเวอร์เตอร์มีราคาแพง
2) คอนเวอร์เตอร์ทำให้เกิดฮาร์โมนิกทั้งทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง
3) คอนเวอร์เตอร์ต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูง
4) คอนเวอร์เตอร์มีความสามารถในการรองรับสภาวะโหลดเกินต่ำ

ระบบเอชวีดีซีในประเทศไทย [8]

สำหรับในประเทศไทยได้มีการนำเอาระบบเอชวีดีซี มาใช้ในการเชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าของประเทศไทยกับประเทศมาเลเซียเพื่อทำการซื้อ-ขายพลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่ปี 2545 (ประเทศไทยมีการเชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าของประเทศไทยกับประเทศมาเลเซีย ตั้งแต่ปี 2523 โดยเป็นโครงการเชื่อมต่อระบบส่งไทย-มาเลเซีย ระยะที่ 1 แต่ทำการเชื่อมโยงกันโดยผ่านเอซวีเอซี และมีกำลังเพียง 30-80 MW) โดยโครงการนี้เป็นโครงการเชื่อมต่อระบบส่งไทย-มาเลเซีย ระยะที่ 2 เป็นระบบเอชวีดีซีที่มีขนาดแรงดัน 300 kV, 300 MW โครงการเชื่อมต่อระบบส่งไทย-มาเลเซีย ด้วยระบบเอชวีดีซีนี้ดำเนินการโดย กฟผ.และการไฟฟ้ามาเลเซีย (Tenaga National Berhard: TNB) โดยมีสถานีไฟฟ้าในฝั่งประเทศไทยอยู่ที่ สถานีคลองแงะ จังหวัดสงขลา กับสถานีกูรูน รัฐเคห์ด้า ประเทศมาเลเซีย โดยมีระยะทาง 24 km จากชายแดนฝั่งประเทศไทย และ 86 km จากชายแดนประเทศมาเลเซีย รวมเป็นระยะทางทั้งหมด 110 km

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 16 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 246271
เลขเรียกหนังสือ

ในระยะแรก ระบบเอชวีดีซีจะใช้เป็นแบบ Monopolar ซึ่งจะทำให้ส่งกำลังไฟฟ้าได้ 300 MW แต่ในอนาคตการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยก็ได้มีโครงการที่จะอัพเกรดเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้เป็น 600 MW โดยการเปลี่ยนเป็นแบบ Bipolar ในปัจจุบันระบบเอชวีดีซีนี้สามารถส่งกำลังได้เต็มที่ 300 MW (300 kV, 1,000 A) และสามารถจ่ายกำลังเกินได้ถึง 450 MW ในระยะเวลาไม่เกิน 10 นาที

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของระบบเอชวีดีซีของประเทศไทย

ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส	100 mH, แกนเดี่ยว (Single Core)
หม้อแปลงสำหรับ	Converter 3x116 MVA, 1 เฟส 3 ขด 230/122.24/122.24 kV
ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ	ไทย: EGAT 230 kV; 50 Hz
	มาเลเซีย: TNB 275 kV, 50 Hz
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	+/- 300 kV
ขนาดของไทริสเตอร์	8 kV, 1,550 A
จำนวนของไทริสเตอร์	1,152 ตัว
วงจรกรอง	วงจรกรองแบบ Passive (ฮาร์โมนิกอันดับที่ 12/24)
	วงจรกรองแบบ Active (ฮาร์โมนิกอันดับที่ 6/15/21/24/27/33/42/48)
สายส่งกำลัง	DC, 110 km
	ตัวนำโพล (Pole Conductor): 546 mm^2
	ตัวนำนิวตรอล (Neutral Conductor): 298 mm^2
เงินลงทุน	4,980 ล้านบาท
ผู้รับเหมาหลัก	Siemens AG, Germany

เทคโนโลยีของเอชวีดีซีในปัจจุบัน

กระบวนการพื้นฐานของของเอชวีดีซีคือ แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่ฝั่งเรกติฟายเออร์ และแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่ฝั่งอินเวอร์เตอร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีทางเลือกในการแปลงไฟฟ้าดังที่กล่าวอยู่ 2 วิธีด้วยกันดังนี้

- ใช้ Thyristor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำเป็นส่วนประกอบหลักในคอนเวอร์เตอร์ โดย Thyristor สามารถควบคุมการเปิดของวงจรได้เท่านั้น โดยสามารถทนกระแสได้สูงถึง 4,000 A และสามารถทนแรงดันได้ถึง 10 kV และเมื่อนำ Thyristor มาต่อกันแบบอนุกรมหลายๆ ตัวจะเรียกว่า Thyristor valve ซึ่งสามารถทนแรงดันได้สูงถึงหลายร้อย kV โดย Thyristor valve นี้จะทำงานที่ความถี่ประมาณ 50-60 Hz และ ยังสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการควบคุมมุมจุดชนวนนั่นเอง

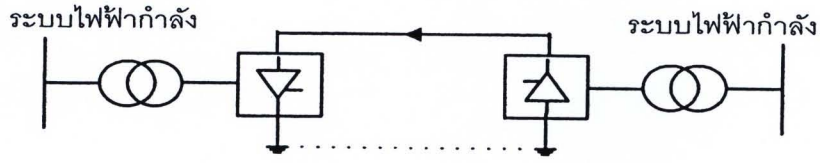
- ใช้ Voltage Source Converters (VSC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกับ Thyristor เป็นส่วนประกอบหลักในคอนเวอร์เตอร์ โดย VSC สามารถควบคุมการเปิด-ปิดของวงจรได้ด้วยตัวเอง โดย VSC จะทำงานที่ความถี่ค่อนข้างสูง ข้อดีของ VSC ก็คือสามารถควบคุมกำลังกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ได้อย่างอิสระต่อกันอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการใช้ เอชวีดีซีแบบ VSC นี้จะไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ใช้สำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียไปในขั้นตอนการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง หรือกระแสตรงเป็นกระแสสลับเลย อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเอชวีดีซีแบบ VSC ไม่สามารถทนแรงดันระดับสูงๆ ได้

3.2 โครงสร้างของเอชวีดีซี [9]

โครงสร้างของอุปกรณ์เอชวีดีซีมีหลายโครงสร้างขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้หรือความต้องการในการใช้งาน ในที่นี้จะเสนอโครงสร้างแบบทั่วไป 4 รูปแบบดังนี้

โครงสร้างแบบขั้วเดียว (Monopolar link)

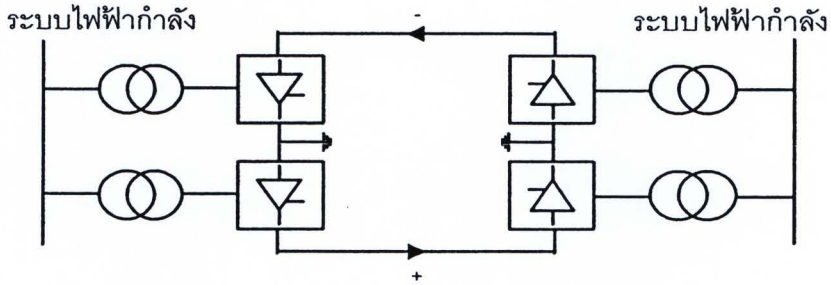
โครงสร้างนี้ประกอบไปด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัวซึ่งอยู่ต่างสถานีกัน โดยมีสายส่งกระแสตรงเชื่อมระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสอง โดยสายส่งกระแสตรงโดยส่วนมากจะให้เป็นขั้วลบ เนื่องจากขั้วลบมีการเกิดโคโรน่าน้อย และใช้อิเล็กโทรดหรือกราวด์เพื่อทำให้ระบบครบวงจรดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างเอชวีดีซีแบบขั้วเดียว

โครงสร้างแบบสองขั้ว (Bipolar link)

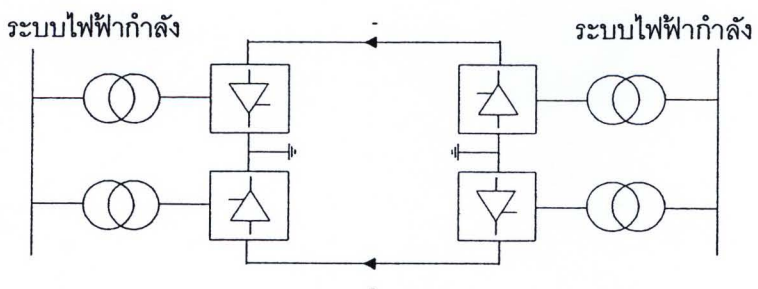
โครงสร้างนี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบขั้วเดียว 2 โครงสร้างรวมเข้าด้วยกันดังนั้นจึงสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้เป็น 2 เท่าของโครงสร้างแบบขั้วเดียว โดยที่แต่ละโครงสร้างจะมีขั้วตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีอิเล็กโทรดหรือกราวด์เพื่อทำให้ระบบครบวงจร โดยโครงสร้างแบบสองขั้วนี้สามารถทำงานแยกระบบกันได้ ดังนั้นเมื่อขั้วใดขั้วหนึ่งเกิดความผิดพร่องจนไม่สามารถทำงานได้ อีกขั้วหนึ่งก็ยังสามารถทำงานต่อไปได้ เพียงแต่กำลังไฟฟ้าที่ส่งได้จากเดิมจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งนั่นเอง



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเอชวีดีซีแบบสองขั้ว

โครงสร้างแบบขั้วเหมือน (Homopolar link)

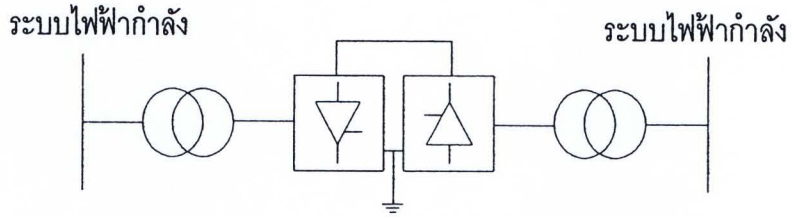
โครงสร้างนี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบขั้วเดียว 2 โครงสร้างรวมเข้าด้วยกันดังนั้นจึงสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้เป็น 2 เท่าของโครงสร้างแบบขั้วเดียว โดยที่แต่ละโครงสร้างจะมีขั้วที่เหมือนกัน โดยทั่วไปนิยมให้เป็นขั้วลบดังแสดงในรูปที่ 3.3 และมีอิเล็กโทรดหรือกราวด์เพื่อทำให้ระบบครบวงจร โดยโครงสร้างแบบขั้วเหมือนนี้สามารถทำงานแยกระบบกันได้ ดังนั้นเมื่อขั้วใดขั้วหนึ่งเกิดความผิดพร่องจนไม่สามารถทำงานได้ อีกขั้วหนึ่งก็ยังสามารถทำงานต่อไปได้ เพียงแต่กำลังไฟฟ้าที่ส่งได้จากเดิมจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งนั่นเอง อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบขั้วเหมือนนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่ากับโครงสร้างแบบสองขั้ว เนื่องจากสภาวะการทำงานของโครงสร้างแบบขั้วเหมือนต้องอาศัยเส้นทางกลับเป็นอิเลกโทรดหรือกราวด์ตลอดเวลา ซึ่งมีผลข้างเคียงทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosion) ในตัวนำ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างเอชวีดีซีแบบขั้วเหมือน

โครงสร้างแบบหลังชนหลัง (Back to back)

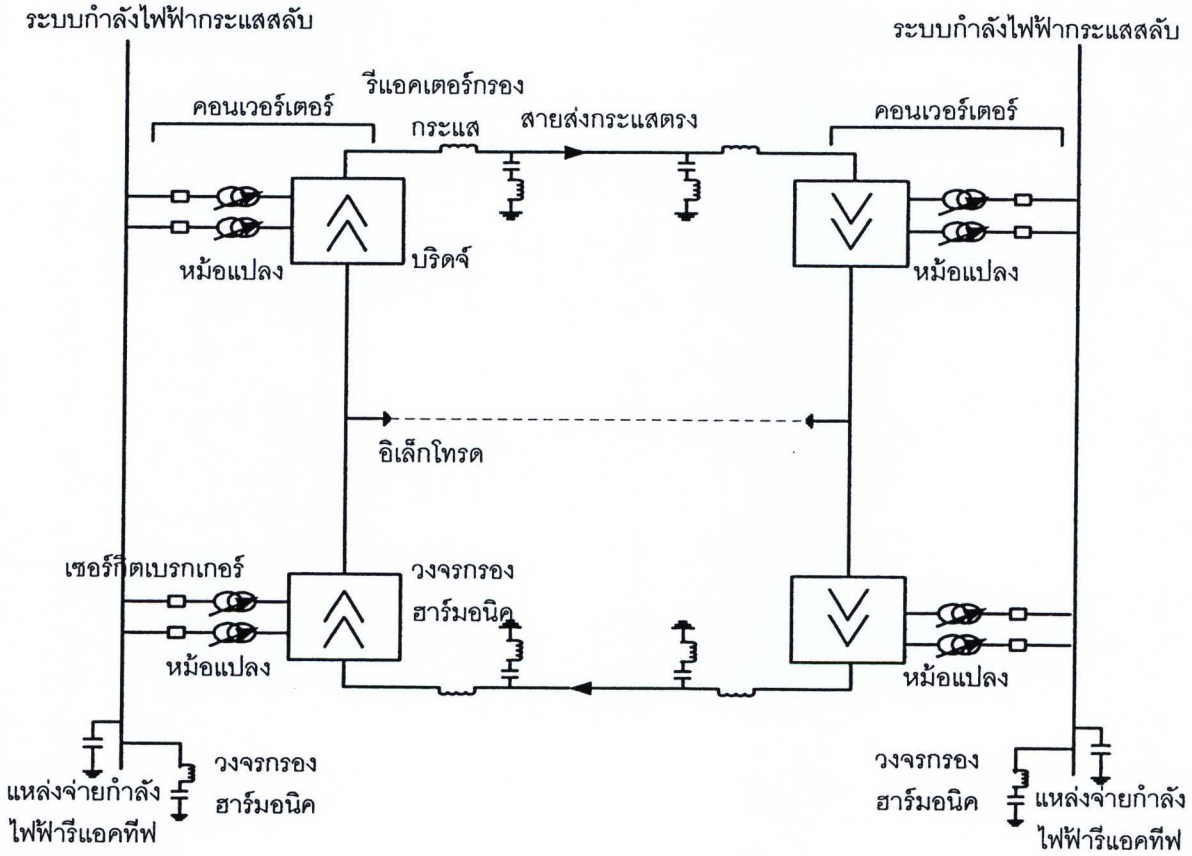
โครงสร้างนี้ประกอบไปด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัวขนาดเท่ากัน และอยู่ในสถานีเดียวกัน โดย โครงสร้างแบบนี้จะไม่มีสายส่งกระแสตรง ดังรูปที่ 3.4 โดยจุดประสงค์ของเอชวีดีซีแบบหลังชนหลังนี้ เพื่อเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงกันแต่ความถี่ของระบบแตกต่างกันนั่นเอง



รูปที่ 3.4 โครงสร้างเอชวีดีซีแบบหลังชนหลัง

3.3 ส่วนประกอบของเอชวีดีซี

ในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างหลักๆ ภายในเอชวีดีซี โดยใช้ระบบเอชวีดีซีแบบสองขั้วดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อประกอบการอธิบาย



รูปที่ 3.5 โครงสร้างภายในระบบเอชวีดีซีแบบสองขั้ว

คอนเวอร์เตอร์ (Converter)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) หรือแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) โดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นวงจรบริดจ์แบบสามเฟสจำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกัน เพื่อสร้างสัญญาณเอาท์พุตแบบ 12 พัลส์

รีแอกเตอร์กรองกระแส (Smoothing reactor)

เป็นรีแอกเตอร์ขนาดใหญ่ที่ต่ออนุกรมเข้ากับขั้วของสถานีคอนเวอร์เตอร์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้กระแสไฟฟ้าทางด้านกระแสตรงเรียบ

วงจรกรองฮาร์โมนิก

จะแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ตัวกรองไฟฟ้ากระแสสลับและตัวกรองไฟฟ้ากระแสตรง ตัวกรองไฟฟ้ากระแสสลับจะทำหน้าที่กรองฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ซึ่งกระแสฮาร์โมนิกเหล่านี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวเก็บประจุและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และยังรบกวนระบบสื่อสารที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ส่วนตัวกรองไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ในการกรองฮาร์โมนิกในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากในทุกๆ โหมดการทำงานของเอชวีดีซีจะสร้างฮาร์โมนิกขึ้นมานั่นเอง ซึ่งฮาร์โมนิกนี้หากมีมากจะทำให้เกิดการทำงานผิดจังหวะ (Commutation failure) ในการทำงานของวงจรบริดจ์ในคอนเวอร์เตอร์ได้ และรีแอกเตอร์กรองกระแสยังช่วยหลีกเลี่ยงความไม่ต่อเนื่องของกระแส ณ สภาวะโหลดน้อยอีกด้วย

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียไปเนื่องจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

อิเล็กโทรด

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อให้ระบบไฟฟ้าครบวงจร ปกติจะใช้ดินหรือสายนิวทรัล

สายส่งกระแสตรง

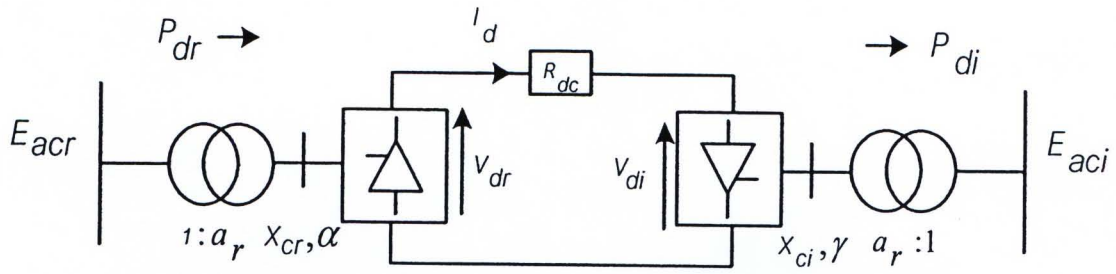
เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นสายเหนือดินหรือสายใต้ดินก็ได้

เซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB)

เป็นอุปกรณ์ในการกำจัดความผิดพร่องในหม้อแปลงและใช้ปลดสายส่งกระแสตรงในสภาวะผิดปกติ

3.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของเอชวีดีซี [9]

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมการต่างๆ ที่อธิบายการทำงานของเอชวีดีซี โดยแบบจำลองเอชวีดีซีที่ใช้อธิบายได้แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองอย่างง่ายของเอชวีดีซี

โดยที่

E_{acr}, E_{aci} คือ แรงดันไฟสลับฝั่งเรกติฟายเออร์ และ ฝั่งอินเวอร์เตอร์ตามลำดับ

V_{dr}, V_{di} คือ แรงดันไฟตรงฝั่งเรกติฟายเออร์ และ อินเวอร์เตอร์ตามลำดับ

I_d คือ กระแสไฟตรง

X_σ, X_σ คือ คอมมิวเตชั่นรีแอคแตนซ์ (Commutation reactance) ของวงจรเรกติฟายเออร์ และ อินเวอร์เตอร์ตามลำดับ

α คือ มุมจุดชนวน (Ignition angle) ของวงจรเรกติฟายเออร์

γ คือมุมหยุดนำกระแส (Extinction angle) ของวงจรอินเวอร์เตอร์

a_r, a_i คือแท็บของหม้อแปลงฝั่งเรกติฟายเออร์ และ อินเวอร์เตอร์ตามลำดับ

R_{dc} คือความต้านทานในสายส่งไฟตรง

P_{dr}, P_{di} คือกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าเรกติฟายเออร์ และ อินเวอร์เตอร์ตามลำดับ

ซึ่งสมการในสภาวะชั่วครู่ของระบบ HVDC สามารถเขียนได้ดังสมการ (3.1) – (3.5)

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r E_{acr} \tag{3.1}$$

$$V_{dr} = V_{aor}\cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} X_{cr} I_{dc} \tag{3.2}$$

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i E_{aci} \tag{3.3}$$

$$V_{di} = V_{aoi}\cos(\gamma) - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_{dc} \tag{3.4}$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_{dc}} \tag{3.5}$$

สมการที่ (3.2) และ (3.4) แสดงให้เห็นว่า มุมจุดชนวน (α) และ มุมหยุดนำกระแส (γ) ส่งผลต่อแรงดันไฟตรงทางฝั่งเรกติฟายเออร์ และ อินเวอร์เตอร์ตามลำดับ โดยขึ้นกับค่า $\cos(\alpha)$ และ $\cos(\gamma)$ ซึ่ง α มีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา ส่วน γ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 180 องศา

เนื่องจากค่าคอมมิวเตชั่นรีแอกแตนซ์ X_c ของคอนเวอร์เตอร์ทำให้กระแสเฟสไม่สามารถเปลี่ยนได้ในทันทีทันใด ดังนั้นค่าคอมมิวเตชั่น หรือ ค่าเวลาทับซ้อนจึงถูกนิยามขึ้น และผลกระทบนี้จะถูกแทนด้วยแรงดันตกที่ตกคร่อมค่าความต้านทานค่าหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับ $R_c = \frac{3}{\pi} X_c$ ดังนั้น มุมทับซ้อน (Overlap angle, μ) จึงไม่ปรากฏในวงจรสมมูล

โดยทั่วไปแล้ว ที่สภาวะการทำงานปกติ มุมจุดชนวนทางฝั่งเรกติฟายเออร์ (α) มีค่าอยู่ในช่วง 15 ถึง 20 องศา และมุมหยุดนำกระแสทางฝั่งอินเวอร์เตอร์ (γ) มี 15 และ 18 องศา กรณีที่ฝั่งอินเวอร์เตอร์เชื่อมกับระบบที่มีความถี่ 50 และ 60 Hz ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.6 นอกจากจะมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลจากฝั่งเรกติฟายเออร์ ไปยังฝั่งอินเวอร์เตอร์แล้ว ยังคงมีกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ทั้งทางฝั่งเรกติฟายเออร์ และทางฝั่งอินเวอร์เตอร์ด้วย ดังแสดงในสมการที่ (3.6)-(3.8)

$$P_{dr} = V_{dr} I_{dc} \tag{3.6}$$

$$Q_{dr} = P_{dr} \tan(\varphi_r) \tag{3.7}$$

โดยที่

$$\varphi_r = \cos^{-1}\left(\frac{V_{dr}}{V_{dr0}}\right) \tag{3.8}$$

เช่นเดียวกันกับฝั่งเรกติฟายเออร์สมการกำลังฝั่งอินเวอร์เตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.9) – (3.11)

$$P_{di} = V_{di} I_{dc} \tag{3.9}$$

$$Q_{di} = -P_{di} \tan(\varphi_i) \tag{3.10}$$

โดยที่

$$\varphi_i = \cos^{-1}\left(\frac{V_{di}}{V_{di0}}\right) \tag{3.11}$$

3.5 แบบจำลองในการประเมินความเชื่อถือได้ของเอชวีดีซี

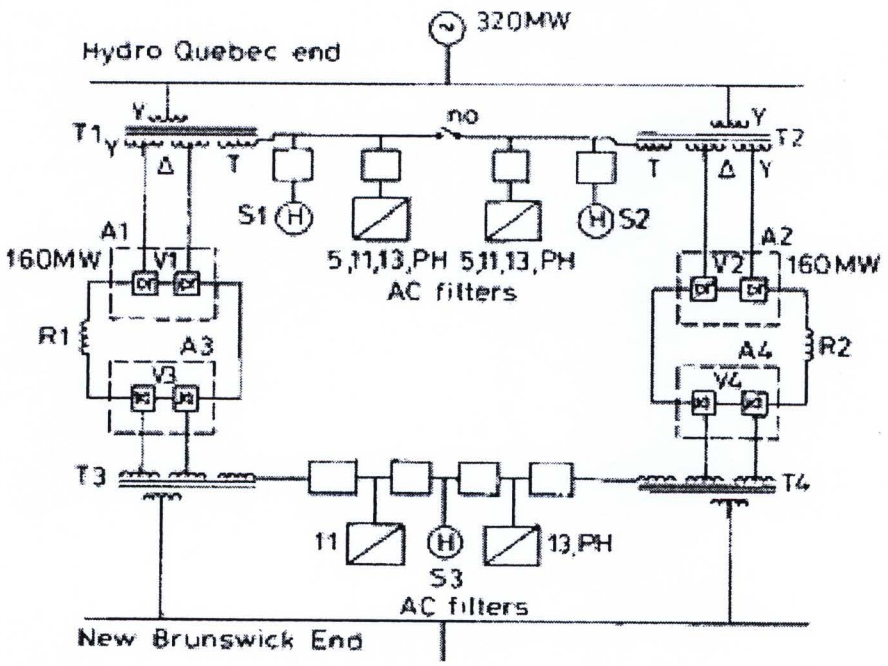
ในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งเอชวีดีซี จำเป็นต้องมีแบบจำลองในการประเมินความเชื่อถือได้ของเอชวีดีซีด้วย โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการในการสร้างแบบจำลองของเอชวีดีซีที่ใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ 1) ไดอะแกรมความเชื่อถือได้ของเอชวีดีซี และ 2) รายการผลของอุปกรณ์ต่างๆ ของเอชวีดีซีที่กระทบต่อสมรรถภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

ไดอะแกรมความเชื่อถือได้ของเอชวีดีซี

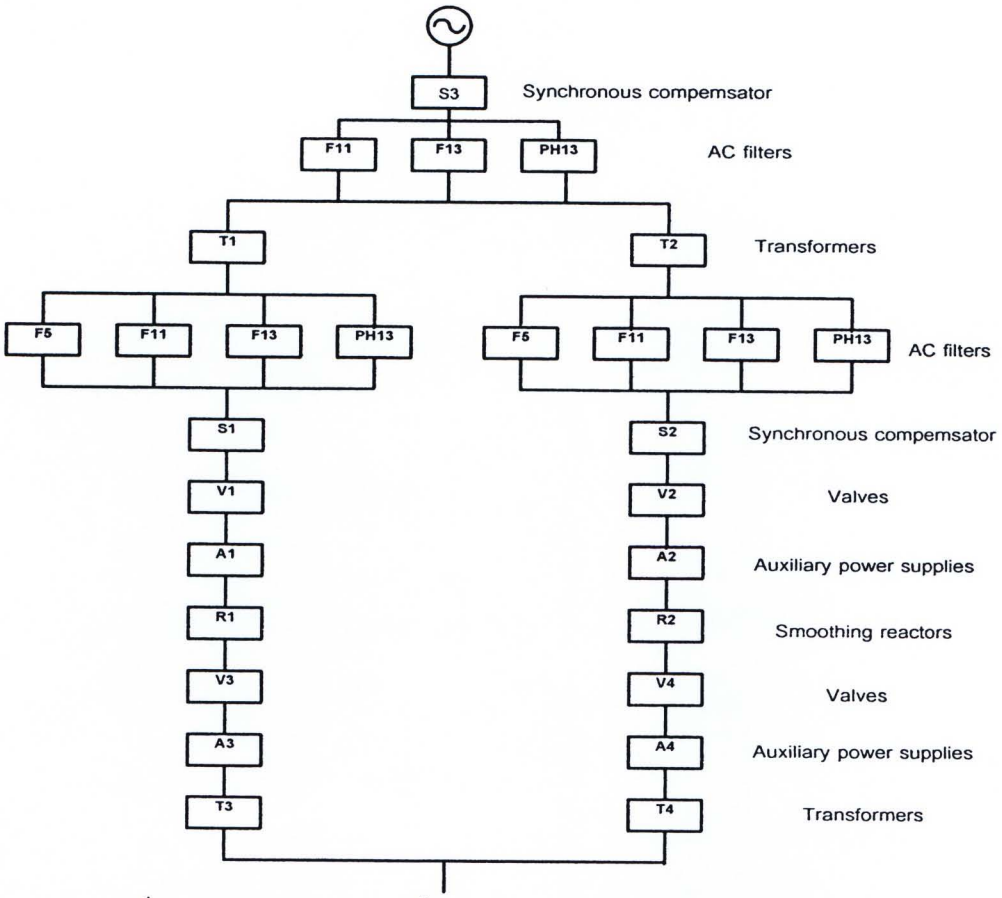
ไดอะแกรมความเชื่อถือได้ของเอชวีดีซีจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ภายในของเอชวีดีซีว่ามีความเกี่ยวเนื่องกันเช่นใด โดยมีหลักการในการเขียนไดอะแกรมดังต่อไปนี้

1) อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ประเภทอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเสียแล้วมีผลทำให้อุปกรณ์อื่นๆ ไม่สามารถใช้งานได้ จะถูกจัดให้มีลักษณะการต่อกันแบบอนุกรม
2) อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ประเภทอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเสียแล้วไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ตัวอื่นๆ จะถูกจัดให้มีลักษณะการต่อกันแบบขนาน
3) กลุ่มของอุปกรณ์ที่มีผลต่อสมรรถภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะถูกจัดให้มีลักษณะการต่อกันแบบขนาน

จากหลักการดังที่กล่าวมาสามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมความเชื่อถือได้ของเอชวีดีซี ดังเช่น ตัวอย่างจากระบบ EEL river DC system [10] รูปที่ 3.7 สามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมความเชื่อถือได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ EEL river DC system model



รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมความเชื่อถือได้ของ EEL river DC system model

รายการผลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเอชวีดีซีที่กระทบต่อสมรรถภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากอุปกรณ์บางประเภทในเอชวีดีซี เช่น ตัวกรองฮาร์โมนิก (AC filter) จากรูปที่ 3.8 AC filter F11, F13, PH13 ซึ่งเชื่อมต่อกันแบบขนาน หากมองอย่างง่ายจะเห็นได้ว่าจะสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้เต็มกำลังเสมอยกเว้นกรณีเดียวคือ F11, F13, PH13 เสียพร้อมกันหมด แต่ในความเป็นจริงกลับไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากจำเป็นต้องคิดผลของสมรรถภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของ AC filter แต่ละตัวด้วย ดังเช่นตารางที่ 3.2 แสดงสมรรถภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของ AC filter ฝั่งอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 Inverter filters capacities

Combination	Group capacity (%)
F11, F13, PH13	100
F11, PH13	100
F11, F13	100
Others	0