บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังและปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.2 การชดเชยกำลังไฟฟ้า

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง และรักษาระดับแรงดันที่โหลด ซึ่งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อลดกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังงานสูญเสียและแรงดันตกในระบบ ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อชดเชยความต้องการของโหลดและชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของระบบส่งจ่ายช่วยให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียต่ำและระดับแรงดันตกมีค่าลดลง สำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ชดเชยในตระกูลคัสทอมเพาเวอร์

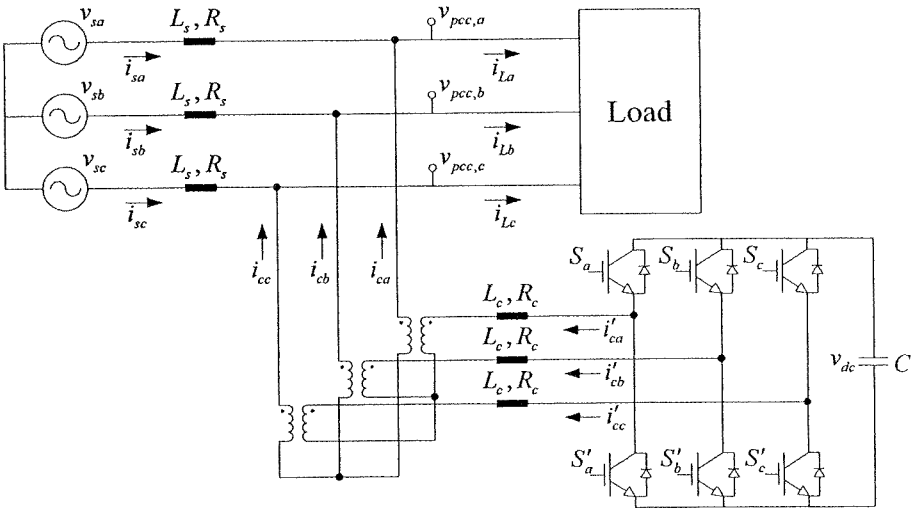
2.2.1 อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์

อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์หรือ CPD เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนิยามขึ้นเพื่อใช้เรียกกลุ่มของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าในระบบจ่าย อุปกรณ์ในตระกูล CPD นี้มีหลายตัว เช่น เอเอสวีซี (Advanced Static Var Compensator: ASVC) ยูพีคิวซี ตัวจำกัดกระแสผิดพร่อง (Solid-state Fault Current Limiter: SSFCL) ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและดี-สแตตคอม เป็นต้น โดยคุณลักษณะเด่นของอุปกรณ์ในตระกูล CPD นั่นคือ ช่วยในการชดเชยกำลังไฟฟ้าและการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างในระบบและลดจำนวนครั้งในการเกิดไฟฟ้าดับ [4] ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียในการใช้งานต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า และสถานการณ์จำเป็นที่ต้องการใช้ตัวชดเชย ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะดี-สแตตคอมเท่านั้น ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2.2 โครงสร้างและการทำงานของดี-สแตตคอม

Distribution Static Compensator (D-STATCOM) หรือดี-สแตตคอม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เป็นอุปกรณ์สวิตช์แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC/AC converter) ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอินเวอร์เตอร์ (Voltage Source Inverter: VSI) 3 เฟส แบบบริดจ์ ตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงดีซี [12] อุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าใน

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในตระกูล CPD ชนิดหนึ่งที่ทำงานต่อขนานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเชื่อมต่อ (coupling transformer) ที่ถอดแบบมาจากสแตตคอม(Static Compensator: STATCOM) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ [10] การควบคุมสวิตช์ร่วมกับการออกแบบวงจรที่เหมาะสมจะทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากดี-สแตตคอมเข้าสู่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ณ จุดต่อเชื่อม เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าให้คงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สภาวะโหลด



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของดี-สแตตคอม

การทำงานหลักของอุปกรณ์นี้ ได้แก่ รักษาระดับแรงดันในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้คงที่ในรูปของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่นำมาชดเชยสร้างได้จากตัวเก็บประจุกระแสตรงในตัวของดี-สแตตคอมเอง ที่สภาวะปกติ ดี-สแตตคอมจะไม่ทำงานแต่ตัวเก็บประจุกระแสตรงจะเก็บสะสมพลังงาน เมื่อเกิดสภาวะการทำงานผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันที่โหลดลดลง แรงดันไฟฟ้านี้จะถูกแปลงแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วส่งขนาดแรงดันนี้ให้กับตัวควบคุม ตัวควบคุมจะทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพื่อให้ได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่นำไปชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติ

2.3 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลัง

ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ทุกขณะและทุกพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะส่วนของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีโหลดจากอุตสาหกรรมซึ่งมีความไวต่อการที่แรงดันตกชั่วขณะในระหว่างเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงและสร้างความเสียหาย

ค่อนข้างสูงต่อผู้ประกอบการ รวมทั้งสร้างความสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและสังคมอีกด้วย ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นจำแนกได้หลายประเภท เช่น เกิดการลัดวงจรของสายส่ง การต่อโหลดเข้าในระบบไฟฟ้ามากเกินไป เป็นต้น ซึ่งการเกิดความผิดพร่องส่วนใหญ่จะเกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า ฝนตก ต้นไม้ การจับแตะของสัตว์และความผิดพลาดของคน เป็นต้น ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ความผิดพร่องแบบเปิดวงจร (open-circuit faults) ได้แก่ การหลุดของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง หรืออุปกรณ์อื่น ๆ และความผิดพร่องแบบลัดวงจร (short-circuit faults) ได้แก่ การลัดวงจรของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ทั้งที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างคู่เฟส หรือระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งลงดิน [4]

สำหรับความผิดพร่องในงานวิจัยนี้จะหมายถึงความผิดพร่องแบบลัดวงจรเท่านั้น ซึ่งความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังแบบลัดวงจรนั้นยังสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. การลัดวงจรสามเฟสสมมาตร (Symmetrical Three-Phase Fault: 3ϕF)
2. การลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single Line-to-Ground Fault: SLGF)
3. การลัดวงจรสองเฟส (Double Line Fault หรือ Line-to-Line Fault: LLF)
4. การลัดวงจรสองเฟสลงดิน (Double Line-to-Ground Fault: DLGF)

โดยจะมีสถิติการเกิดความผิดพร่องในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สถิติการเกิดความผิดพร่องในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า [4]

ชนิดของความผิดพร่อง	เปอร์เซนต์การเกิดความผิดพร่อง
SLGF	85%
LLF	8%
DLGF	5%
3ϕF	2%

จากสถิติการเกิดความผิดพร่องในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินจะมีเปอร์เซนต์การเกิดความผิดพร่องมากที่สุด รองลงมาก็คือ การลัดวงจรสองเฟส การลัดวงจรสองเฟสลงดินและการลัดวงจรสามเฟสสมมาตร ตามลำดับ แต่ถ้าเราจะพิจารณาในเรื่องความรุนแรงของการเกิดความผิดพร่องนั้น การลัดวงจรสามเฟสสมมาตรนั้นจะมีความรุนแรงมากที่สุด ส่วนการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินนั้นจะมีความรุนแรงน้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียง 2 ประเภทเท่านั้น ได้แก่ การลัดวงจรสามเฟสสมมาตร ซึ่งเป็นความผิดพร่องที่ส่งผลกระทบต่อระบบรุนแรงที่สุด และการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน ซึ่งเป็นความผิดพร่องที่พบมากที่สุด

2.4 ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า เป็นเรื่องของความแน่นอนในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายหลัก คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นิยามของคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC และ IEEE จะมีความหมายถึง ลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ ของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย [15] ในปัจจุบันเรื่องของคุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นที่สนใจและนำมาพิจารณากันมาก [22] เนื่องจากสาเหตุใหญ่ ๆ คือ กระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงซึ่งมีความไวในการตอบสนองต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ พีแอลซี (Programmable Logic Controller: PLC) และตัวขับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive: ASD) เป็นต้น การเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้า [18] เช่น การใช้อุปกรณ์ ASD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ซึ่ง ASD เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก ก็จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นได้ และถ้ามีตัวเก็บประจุติดตั้งอยู่ในระบบเพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้า ก็ยิ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกรุนแรงมากยิ่งขึ้น ผู้ใช้ไฟฟ้าทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมของตัวเองมากขึ้น เช่น ปัญหาจากแรงดันตกชั่วขณะ ทำให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยต้องหาแนวทางและวิธีการเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น เป็นต้น

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพกำลังงานไฟฟ้าเสียไปนั้นเราอาจจะแบ่งแยกสาเหตุออกได้หลายรูปแบบ เช่น ปรากฏการณ์ธรรมชาติ การเกิดสภาวะความผิดพร่องในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า การทำงานของอุปกรณ์ประเภทสวิตชิง (switching) การทำงานของอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม การต่อกราวด์ (grounding) ในระบบไม่ถูกต้อง เป็นต้น เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของกำลังงานไฟฟ้าขึ้นย่อมจะทำให้ลักษณะของรูปคลื่น แรงดัน กระแส ตลอดจนความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 2.2 [15] ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (short duration voltage variation) เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะแต่ละประเภทของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

ประเภท	ช่วงการเกิด	ช่วงระยะเวลาการเกิด	ช่วงขนาดของแรงดัน
1. ภาวะชั่วครู่			
1.1 อิมพัลส์ชั่วครู่			
1.1.1 ns	5 ns	< 50 ms	
1.1.2 µs	1 µs	50 µs - 1 ms	
1.1.3 ms	0.1 ms	> 50 ns	
1.2 ออสซิเลทชั่วครู่			
1.2.1 ความถี่ต่ำ	< 5 kHz	0.3-50 ms	0 - 4 pu.
1.2.2 ความถี่ปานกลาง	5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 pu.
1.2.3 ความถี่สูง	0.5 - 5 MHz	5 µs	0 - 4 pu.
2. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น			
2.1 ฉับพลัน			
2.1.1 แรงดันหย่อน		0.5 - 30 cycle	0.1 - 0.9 pu.
2.1.2 แรงดันบวม		0.5 - 30 cycle	1.1 - 1.8 pu.
2.2 ชั่วขณะ			
2.2.1 ไฟดับ		0.5 cycle - 3 s	< 0.1 pu.
2.2.2 แรงดันตก		30 cycle - 3 s	0.1 - 0.9 pu.
2.2.3 แรงดันบวม		30 cycle - 3 s	1.1 - 1.4 pu.
2.3 ชั่วคราว			
2.2.1 ไฟดับ		3 s - 1 min	< 0.1 pu.
2.2.2 แรงดันหย่อน		3 s - 1 min	0.1 - 0.9 pu.
2.2.3 แรงดันบวม		3 s - 1 min	1.1 - 1.2 pu.
3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว			
2.2.1 ไฟดับ		> 1 min	0 pu.
2.2.2 แรงดันหย่อน		> 1 min	0.8 - 0.9 pu.
2.2.3 แรงดันบวม		> 1 min	1.1 - 1.2 pu.
4. แรงดันไม่สมดุล		สถานะคงตัว	0.5 - 2 %
5. ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น			
5.1 องค์ประกอบไฟตรง		สถานะคงตัว	0 - 0.1 %
5.2 ฮาร์มอนิก	0 - 100 th H	สถานะคงตัว	0 - 20 %
5.3 อินเตอร์ฮาร์มอนิก	0 - 6 kHz	สถานะคงตัว	0 - 2 %
5.4 คลื่นรอยบาก		สถานะคงตัว	
5.5 สัญญาณรบกวน	ช่วงกว้าง	สถานะคงตัว	0 - 1 %
6. แรงดันกระเพื่อม	< 25 Hz	ไม่สม่ำเสมอ	0.1 - 7 %
7. การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า		< 10 s	

2.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึง การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป