



การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ FACTS
Improve Power System Stability with FACT Devices

มนัส บุญเทียรทอง
นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

หัวข้องานวิจัย	การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ FACTS
ผู้รับผิดชอบ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเทียรทอง รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สังกัด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีงบประมาณ	2561

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีการขยายตัวซับซ้อนมากขึ้นส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพและความมั่นคงกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมจึงเป็นอุปกรณ์ FACTS ที่มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถส่งเสริมเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดี

งานวิจัยนี้นำเสนอการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง มาเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยศึกษาผลกระทบการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ควบคุม การไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ประกอบด้วย ตัวชดเชยแบบขนาน และ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ให้เป็นแหล่งจ่ายอิสระ สำหรับเทคนิคที่นำเสนอเป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือนและบัสแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังโดยการทดสอบแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าติดตั้งอยู่จำนวน 5 บัส เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน จากการผลทดสอบแสดงให้เห็นถึงการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

คำสำคัญ : การเพิ่มเสถียรภาพ ระบบไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ FACTS

Research Topics	Improve Power System Stability with FACT Devices
By	Asst. Prof. Dr.Manat Boonthienthong Assoc. Prof. Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep
Affiliation	Faculty of Engineering RMUTP
Budget Year	2018

Abstract

At present, the electrical power system has growth and more complicate. Because of the development of the economics and society. An increasing the demand of power transmission line system would be resulted in the stability and reliability. The Flexible AC Transmission System devices: (FACTS) is the equipment, which can control the flow of real power. In addition, it can gladly encourage the stability and reliability of the power transmission line system.

This research proposed the impact of placing power electronics device to increase stability and reliability of power system in order to study the impact of Flexible AC Transmission System devices: (FACTS) devices for the resulting to stability of power system. UPFC devices model which consisted of Static Synchronous Compensator and Static Synchronous Series Compensator that worked as independent voltage source for technique to proposed control the flow of real power and reactive power as well as voltage bus in power system. Testing Simulation power flow control of 5 buses by placing unified power flow control indicated the effective compensation of real power and reactive power in power system.

Keywords: Increase stability, Power system, Flexible AC Transmission System devices:

FACTS

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ข้อมูล ขอบพระคุณอาจารย์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสำเร็จแต่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้จัดทำใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่ให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และให้กำลังใจในการทำงาน ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้เป็นประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้าต่อผู้สนใจ และเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

มนัส บุญเทียรทอง
นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานของการดำเนินการ	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.5 นิยามคำศัพท์	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย	3
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นได้	6
2.4 หลักการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	13
2.5 การรักษาระดับแรงดัน	16
2.6 สรุปผลการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	22
3.1 บทนำ	22
3.2 การออกแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า	24
3.3 การออกแบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	25
3.4 สรุปท้ายบท	28

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลจำลองการทำงาน	29
4.1 บทนำ	29
4.2 ผลจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า	30
4.3 ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า แบบรวม	31
4.4 สรุปผลการจำลอง	34
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	35
5.1 บทนำ	35
5.2 สรุปผล	35
5.3 ข้อเสนอแนะ	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก	38
ประวัติผู้จัดทำ	44



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ค่าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ	31
4.2	ค่าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	33
4.3	ค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ก่อนและหลังการติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	33

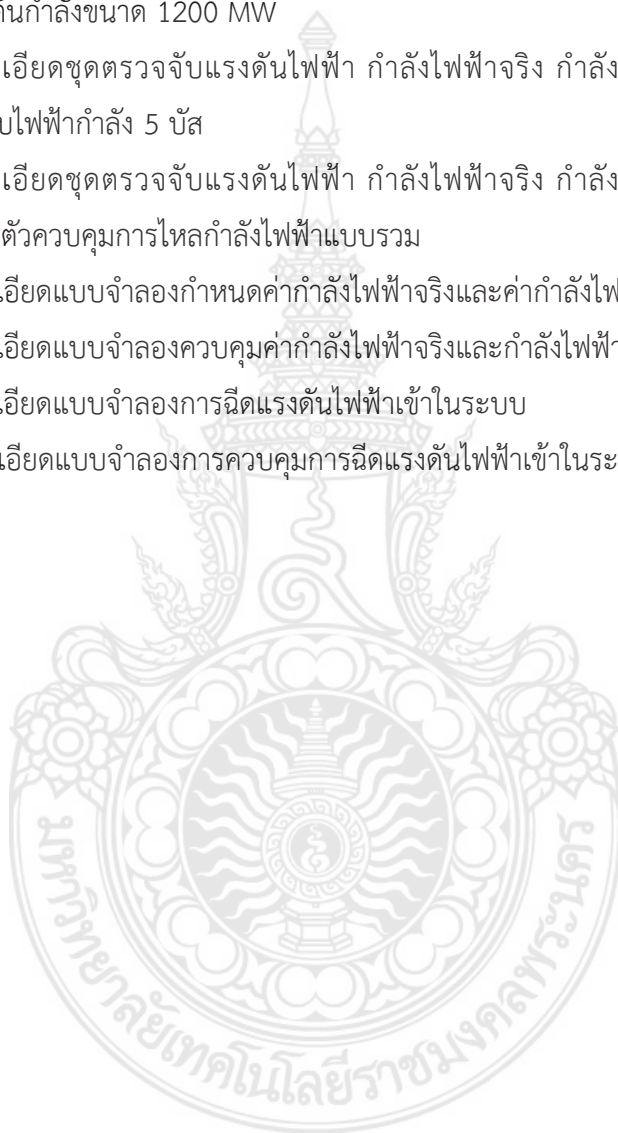


สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	2
2.1	8
2.2	8
2.3	9
2.4	9
2.5	13
2.6	14
2.7	14
2.8	14
2.9	16
2.10	17
2.11	18
2.12	18
3.1	22
3.2	24
3.3	25
3.4	25
3.5	26
3.6	28
3.7	28
4.1	29
4.2	30
4.3	30
4.4	30
4.5	31
4.6	32
4.7	32
4.8	32

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.1	ชุดโรงต้นกำลังขนาด 1000 MW	39
ก.2	ชุดโรงต้นกำลังขนาด 1200 MW	40
ก.3	รายละเอียดชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ ในระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส	41
ก.4	รายละเอียดชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ ที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	41
ก.5	รายละเอียดแบบจำลองกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ	42
ก.6	รายละเอียดแบบจำลองควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ	42
ก.7	รายละเอียดแบบจำลองการฉีดแรงดันไฟฟ้าเข้าในระบบ	43
ก.8	รายละเอียดแบบจำลองการควบคุมการฉีดแรงดันไฟฟ้าเข้าในระบบ	43



บทที่ 1

บทนำ

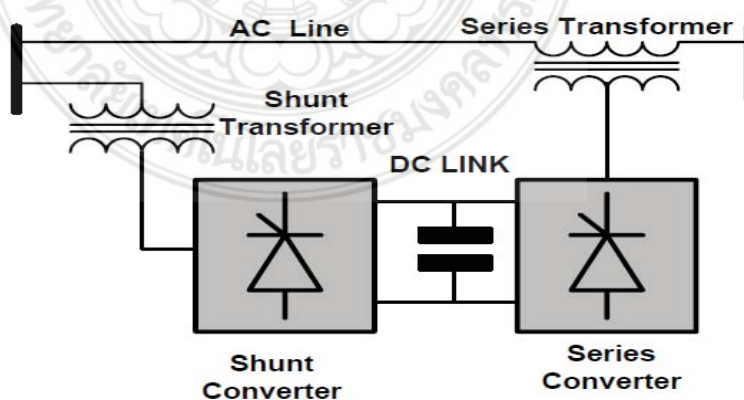
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม และการขยายตัวภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีอัตราการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง พลังงานไฟฟ้า ได้เข้าไปมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาทั้งทางเศรษฐกิจและสังคม ผลที่เกิดขึ้นคือทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และทำให้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นทำได้ยากขึ้น เช่น สายส่งบางเส้นนั้นต้องรับภาระในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ใกล้กับพิกัดสูงสุด ในขณะที่บางเส้นนั้นน้อยกว่าที่ออกแบบไว้มาก อีกทั้งยังส่งผลทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นลดลง จากการเปิดโอกาสให้ภาคเอกชนได้เข้ามามีส่วนร่วมในการผลิตกำลังไฟฟ้า ทำให้ในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมการผลิตกำลังไฟฟ้านั้นมีการแข่งขันที่สูงมาก ในเรื่องของราคา จึงทำให้ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าในแต่ละรายพยายามหาทางลดต้นทุนการผลิต ประกอบกับทางด้านสิ่งแวดล้อม สิ่งเหล่านี้ทำให้วิศวกรรมทางลดการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังขึ้นมาใหม่ให้น้อยที่สุดเช่น พยายามหาทางใช้ประโยชน์สายส่งในเส้นที่ต่ำกว่าพิกัดมากๆ และ นอกจากผู้ผลิตจะต้องแข่งขันกันในเรื่องของราคา และการลดต้นทุนในการผลิต ผู้ผลิตยังจะต้องแข่งขันกันในเรื่องของคุณภาพไฟฟ้า หรือเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่อาจจะสร้างความเสียหายให้กับผู้บริโภค และอาจส่งผลต่อความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตเอง

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้ากำลังได้แก่ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า และส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า ส่วนประกอบเหล่านี้ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับการส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลดซึ่งโหลดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านี้จะพิจารณาในลักษณะของกลุ่มโหลดที่ต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าย่อยปลายทาง ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ที่มีระยะทางของสายส่งประเภทนี้หลายร้อยกิโลเมตร ซึ่งจะดำเนินการส่งจ่ายด้วยระบบแรงดันสูง 115 kV, 230 kV และ 500 kV ขึ้นอยู่กับระบบที่นำมาใช้ ในส่วนของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่จ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านระบบสายป้อนที่มีระดับแรงดันตั้งแต่ 3-34 kV สายป้อนนี้ถูกต่อออกมาจากสถานีไฟฟ้าย่อย โดยสถานีไฟฟ้าย่อยจะเป็นที่รวมการจ่ายโหลดให้กับผู้ใช้ไฟรายย่อย [1]

เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม และการขยายตัวภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีอัตราการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการพัฒนาระบบไฟฟ้าพลังงานไฟฟ้า ได้เข้าไปมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาทั้งทางเศรษฐกิจและสังคม ใช้เป็นพลังงานหลักในการขับเคลื่อนเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่ ส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า และต้องพยายามรักษาเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและมีมาตรฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ เนื่องจากปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือแรงดันตกที่ปลายทางหรือจุดโหลด อันเนื่องมาจากแรงดันตกในสายทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้าและต่อการไฟฟ้าเอง นอกจากนี้การเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าที่เกิดจากการลัดวงจร เกิดจากการต่อโหลดไฟฟ้าที่มากเกินไปกักตัวของสายส่ง ปัญหาทางด้านขนาดของแรงดัน เมื่อแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ห่างไกลกันกับโหลดทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียขึ้นในสายส่ง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางมีขนาดลดลง และทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อที่ปลายทางมีการชำรุดเสียหาย

เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าภายใต้การทำงานผิดปกติในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยเน้นไปที่ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ (Flexible AC Transmission System devices: FACTS) ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อศึกษาผลกระทบของการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงกับกำลังไฟฟารีแอกทีฟ โดยอุปกรณ์ FACTS มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ และควบคุมระดับแรงดันบัส ในระบบไฟฟ้ากำลังในโครงการวิศวกรรมนี้จะนำเสนออุปกรณ์ (FACTS) ดังแสดงในรูปที่ 1 ที่ติดตั้งกับระบบไฟฟ้ากำลังโดยอุปกรณ์ เพื่อศึกษาผลกระทบของการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงกับกำลังไฟฟารีแอกทีฟ โดยสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ FACTS ด้วยโปรแกรม MATLAB (Matrix Laboratory) [2, 6]



รูปที่ 1 อุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อประเมินผลเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วย FACTS
- 1.2.3 เพื่อเพิ่มเสถียรของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.2 เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.4 เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.5 เพื่อพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์ประมวลผลการ

1.3 สมมุติฐานของการดำเนินงาน

ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกำลังไฟฟ้าและสามารถชดเชยหรือรักษาแรงดันที่บัสที่ติดตั้งได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบทดสอบแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.4.2 วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย แรงดันไฟฟ้า และการจ่ายโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.4.3 FACTS ที่นำมาใช้ทดสอบ คือ TCSC SVC และ UPFC

1.5 นิยามศัพท์

Unified Power Flow Controller (UPFC) อุปกรณ์ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม Matrix Laboratory โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองหรือใช้คำนวณทางคณิตศาสตร์

Static Synchronous Compensator (STATCOM) อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

Static Synchronous Series Compensator (SSSC) อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระต่ออนุกรมเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

- 1.6.1 สามารถประมวลผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.6.2 สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า
- 1.6.3 ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.6.4 พัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์ประมวลผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และวิเคราะห์อุปกรณ์ชดเชยให้กับระบบไฟฟ้า 3 เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยจำลองการควบคุมระบบขึ้นใน MATLAB โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.7.1 ศึกษาหลักการควบคุมการชดเชยแรงดัน และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

1.7.3 ศึกษาการสร้างชุดควบคุมบนโปรแกรม MATLAB

1.7.4 วิเคราะห์ ออกแบบและทดสอบการตรวจจับแรงดัน ชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าในระบบ

1.7.5 ทดสอบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

1.7.6 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมการไหลทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟบนสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันต่อขนานและอนุกรมเข้ากับสายส่ง โดยคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองชุด เชื่อมต่อกันด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรง คอนเวอร์เตอร์ ที่ต่อขนานมีลักษณะเหมือนกับตัวชดเชยแบบคงที่ (Static Compensator) โดยทั่วไปและจะถูกใช้ควบคุมแรงดันที่บัสที่คอนเวอร์เตอร์ ต่ออยู่ ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ที่ต่ออนุกรมจะมีลักษณะเหมือนกับตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ (Static Synchronous Series Compensator) ซึ่งถูกใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่ง อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบรวมเป็นอุปกรณ์ชดเชยที่ผสมระหว่างอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานและอนุกรมเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในบทนี้จึงได้นำเสนอหลักการการทำงาน เบื้องต้นและหลักการควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ Flexible AC Transmission Systems (FACTS) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้นำเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง มาใช้ เพื่อควบคุมขนาดและ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส [1] มันถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1980 [2] การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิมคือ การปรับมุมเฟส กับ การปรับแท็ป ของหม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ให้ความยืดหยุ่นพอกับความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้อุปกรณ์ FACTSเข้ามาติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อควบคุม การไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และควบคุมบัสแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปี ค.ศ.1998 K. K. Sen and Eric J. Stacey ได้มีการเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ Unified Power Flow Controller (UPFC) [3] โดยใช้โปรแกรม Electromagnetic Transients Program (EMTP) โดย UPFC จะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัวผ่านจุดร่วม DC โดยคอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 เป็น อุปกรณ์ Static Synchronous Compensator (STATCOM) ที่ต่อเข้ากับหม้อแปลงที่ต่อแบบขนานทำหน้าที่ป้อนกระแสไฟฟ้าของขนาดตัวแปร และคอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 เป็น Static Synchronous Series Compensator (SSSC) ต่อเข้ากับหม้อแปลงอนุกรม ทำหน้าที่เป็นตัวป้อน

แรงดันของขนาดตัวแปร การป้อนแรงดันนี้สามารถควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงที่จุดต่อแยกของคอนเวอร์เตอร์ 1 กับในสายไปถึงจุดต่อแยกผ่านจุดร่วม DC

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ FACTS โดยผู้เสนอคือ Y. Xiao Y. H. Song and Y. Z. Sun [4] ในปี ค.ศ. 2002 ได้สังเกตเห็นการพัฒนาวิธีที่ให้การไหลของกำลังไฟฟ้าคงที่ของอุปกรณ์ FACTS พร้อมกับระบบไฟฟ้ากำลัง บนพื้นฐานโมเดลการป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าในระบบของ FACTS ที่เหมาะสมกับการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นความสามารถในการดำเนินการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ใน ปี ค.ศ. 2004 K. M. Son, and R. H. Lasseter ได้นำเสนอ Newton- type current injection model [5] ของ UPFC เพื่อศึกษาผลกระทบของ UPFC บนการแกว่งความถี่ต่ำโดยใช้หลักการของการกำหนดค่าตามสมการสมดุลกระแสไฟฟ้ามันเป็นตัวอย่างแนวความคิดที่ง่ายของการรู้เข้าลักษณะกำลังสอง เป็นรูปแบบที่สามารถนำมาใช้กับชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องจ่าย และ โหลด

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นได้

ความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี ความต้องการระบบไฟฟ้าที่มีความมั่นคงจึงเพิ่มมากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการขยายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มเสถียรภาพและความมั่นคงในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากยิ่งขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการขยายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นถูกจำกัดด้วยเหตุผล ทางสังคมและสิ่งแวดล้อม รวมถึงข้อจำกัดในเรื่องงบประมาณในการลงทุน ส่งผลให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย ต้องหันมาใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ด้วยเหตุนี้สายส่งกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งแรกที่มีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้ความสนใจ เนื่องจากโดยปกติแล้วกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งนั้นถูกจำกัดไว้ที่ขอบเขตของเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งขอบเขตนี้น้อยกว่าขอบเขตของอุณหภูมิของสายส่ง อย่างไรก็ตามในอดีตการใช้สายส่ง ให้เกิดประโยชน์สูงสุดจนถึงขอบเขตของอุณหภูมินั้นเป็นไปได้เนื่องจากอาจส่งผลให้ ขาดเสถียรภาพ ขาดความมั่นคง รวมไปถึงขาดความปลอดภัย ตัวอย่างเช่น กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเป็นฟังก์ชันของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ขนาดและมุมเฟสของแรงดันต้นสายและปลายสาย ดังนั้นในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจะสามารถทำได้โดยการควบคุมตัวแปรเหล่านี้เท่านั้น ซึ่งในอดีตตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมให้เร็วพอที่จะรักษาเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าได้ ทศวรรษที่ 80 สถาบันวิจัยไฟฟ้ากำลัง EPRI (Electric Power Research Institute) ที่เน้นงานวิจัยเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อใช้กับระบบส่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง (High Voltage Direct Current: HVDC) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับการชดเชยสายส่งกระแสสลับ (AC line Compensation) ได้นำเสนอหลักการ

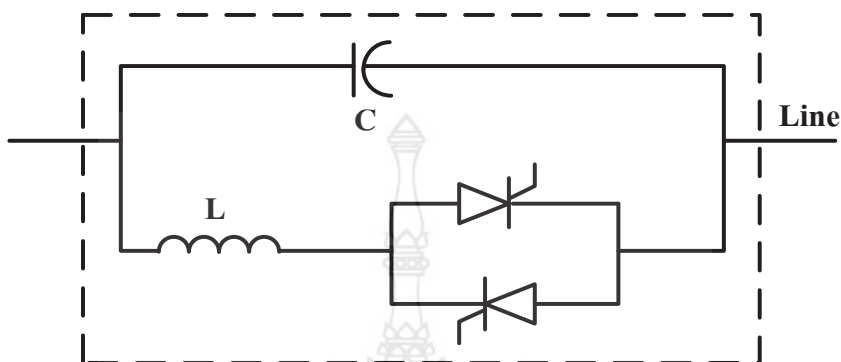
ทั่วไปสำหรับขดเคจรระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เรียกว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ยืดหยุ่นได้ โดยมีวัตถุประสงค์หลักสองประการ ได้แก่การเพิ่มขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง และการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง (Power Flow Control Through Power Transmission Line) ซึ่งได้ตีพิมพ์โดย N.G. Hingorani และ L. Gyugyi ในปี 1991 หลังจากนั้น หลักการของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากหลักการนี้ เป็นทางออกสำหรับการเพิ่มขีดความสามารถของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

นิยามของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ตามมาตรฐานของ Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE หมายถึงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมแบบคงที่ (Static Controller Devices) อย่างอื่น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและส่งเสริมการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง [1] ความสามารถหลักของอุปกรณ์คือ การชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ การควบคุมแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถควบคุมได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชดเชยอย่างเดิม เช่น คาปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor Bank) รีแอกเตอร์ชานาน (Shunt Reactor) และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้สามารถทำงานได้หลายฟังก์ชัน ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Oscillations Damping) และสามารถทำงานร่วมกับการควบคุมระดับสูงของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้เป็นที่ยอมรับในการพัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการ ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่งเสริมเสถียรภาพ ทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต (Static and Dynamic) และนอกจากนี้ยังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้วระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ สามารถจำแนกออกตามโครงสร้างได้ดังนี้

2.3.1 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม

ตัวควบคุมแบบอนุกรมจะต่ออนุกรมกับสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.1 อุปกรณ์ชนิดนี้ อาจเรียกได้ว่าเป็นอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งคาปาซิทีฟรีแอกทีฟ การทำงานหลักของอุปกรณ์ที่ต่อในลักษณะนี้จะเป็นการฉีดแรงดันที่อนุกรมกับสายส่ง การทำงานของอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมจึงเหมือนกับเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ ของสายส่งได้ จุดประสงค์หลักของอุปกรณ์นี้คือการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่ง ตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ในประเภท ตัวควบคุมแบบอนุกรมคือ ตัวชดเชยอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Compensator : TCSC) [7,8] วงจรพื้นฐาน TCSC ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์อนุกรม และรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตัวชดเชย

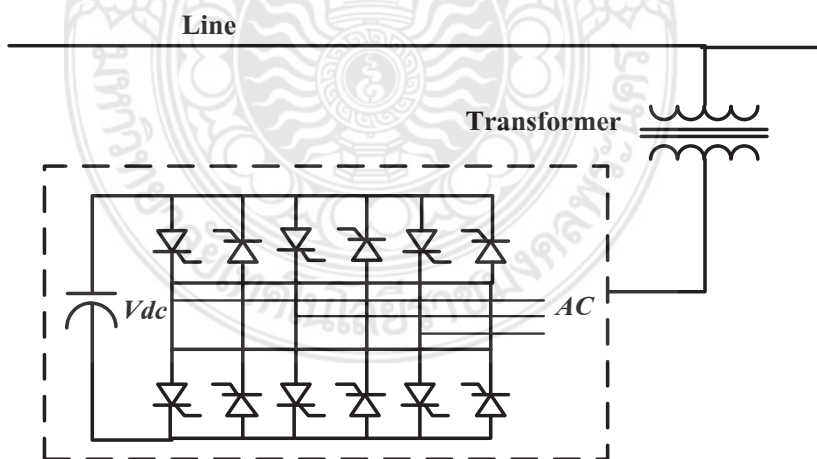
อนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะต่ออนุกรมกับสายส่ง เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม

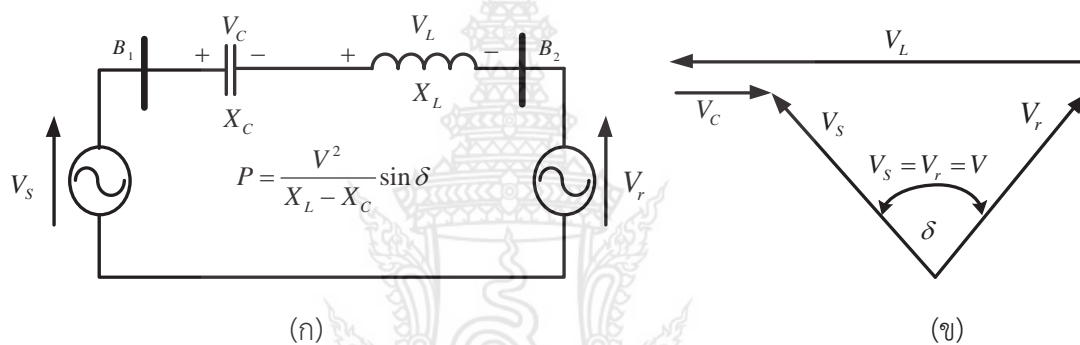
2.3.2 ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่

ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สำคัญในจำพวกของตัวควบคุมแบบอนุกรม โดยส่วนใหญ่แล้วการทำงานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ อาศัยหลักการของตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Sourced Converter: VSC) ซึ่งจะต่ออนุกรมกับสายส่งผ่านหม้อแปลงอนุกรมซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 แรงดันที่ถูกผลิตขึ้นโดยตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่จะถูกฉีดเข้าไปในสายส่งโดยผ่านหม้อแปลงอนุกรมเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมในสายส่ง



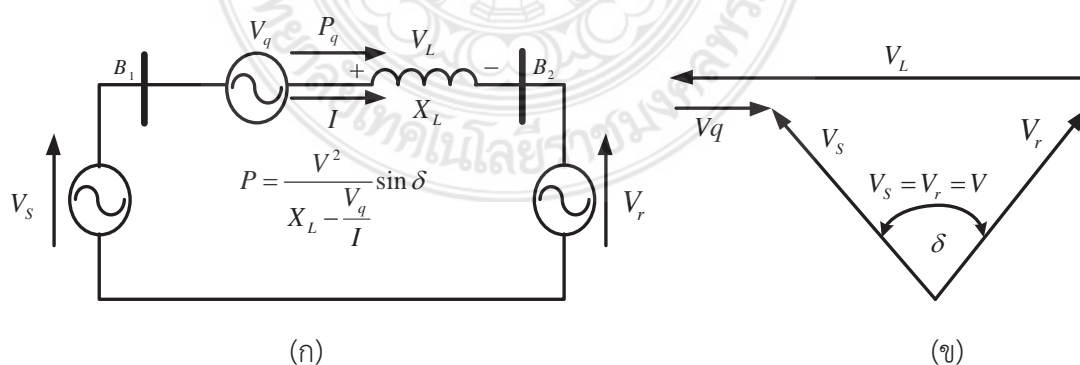
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่

ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ เป็นอุปกรณ์ชดเชยที่อยู่ในกลุ่มของเทคโนโลยีวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Gyugyi ในปี 1989 หลักการทำงานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถอธิบายได้โดยการเริ่มต้นพิจารณา จากการชดเชยด้วยคาปาซิทีฟแบบอนุกรมดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) สัมพันธ์กับเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่กระแสของสายส่งที่กำหนด แรงดันที่ตกคร่อม ตัวคาปาซิเตอร์อนุกรมจะส่งผลให้ แรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์สายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่า การชดเชยคาปาซิทีฟแบบอนุกรมทำงานโดยการเพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแรงดันนี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสในสายส่งและกำลังไฟฟ้าที่สายส่ง



รูปที่ 2.3 ระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน

ลักษณะการชดเชยแบบนี้สามารถทำได้เช่นเดียวกันโดยใช้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ที่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัส (Synchronous AC Voltage) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแรงดันเอาต์พุตนี้มีลักษณะที่เหมือนกันกับแรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์อนุกรมดังสมการ (2.1)



รูปที่ 2.4 ระบบที่ติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน

$$V_q = V_c = -jX_c I = -jkXI \quad (2.1)$$

โดยที่ V_c คือ แรงดันที่ชดเชยด้วยคาปาซิเตอร์

V_s คือ แรงดันไฟฟ้าต้นทาง

V_r คือแรงดันไฟฟ้าปลายทาง

$$V_q = V_c = -jX_c I = -jkXI$$

I คือกระแสไฟฟ้าในสายส่ง

X_c คือ รีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์อนุกรม

$k = \frac{X_c}{X}$ คือ Degree ของการชดเชยแบบอนุกรม

ดังนั้นการทำให้แรงดันชิงโครนัสเอาต์พุต V_q เป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าในสายส่งจะทำให้ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ทำหน้าที่เหมือนกับคาปาซิเตอร์อนุกรม อย่างไรก็ตามในทางตรงกันข้ามกับคาปาซิเตอร์อนุกรม ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถรักษาแรงดันชดเชยให้คงที่ได้ขณะที่กระแสในสายส่งเกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้ว่า ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถควบคุมขนาดของแรงดันชดเชยที่แทรกเข้าไปในสายส่งได้โดยไม่ขึ้นกับกระแสในสายส่ง โดยทั่วไปแล้วการชดเชยคาปาซิทีฟ แรงดันเอาต์พุตจะล้าหลังกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศา สำหรับตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมให้นำหน้าหรือล้าหลังกระแสในสายส่งเป็น มุม 90 องศาได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถลดหรือเพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

ในทำนองเดียวกันกับ TCSC ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ที่สามารถป้องกันการเกิดความไม่เสถียรภาพของแรงดันได้ นอกจากนี้การติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถเพิ่มขีดความสามารถควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย การประยุกต์ใช้งานอีกอย่างหนึ่งของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ คือการนำไปติดตั้งกับระบบไฟฟ้าเพื่อส่งเสริมเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ และยิ่งไปกว่านั้นการติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่และ TCSC มีการประยุกต์ใช้งานเหมือนกันแต่ใน การทำงานและรูปแบบการชดเชยของทั้งสองจะแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้สัมพันธ์กับ ความแตกต่างของวงจรกำลังของอุปกรณ์ทั้งสอง คุณสมบัติของวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ มีความสามารถและรูปแบบการทำงานบางอย่างที่ TCSC ไม่สามารถ ทำได้ ความแตกต่างของอุปกรณ์ทั้งสองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถกำเนิดแรงดันชดเชยที่ควบคุมภายในทั้งย่านคาปาซิทีฟและอินดักทีฟโดยไม่ขึ้นกับขนาดกระแสในสายส่ง ในขณะที่การรักษาแรงดันชดเชยของ TCSC จะขึ้นอยู่กับกระแสในสายส่ง

2. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงภายนอกสามารถชดเชยในส่วนที่เป็นความต้านทานของสายส่ง โดยการฉีดกำลังไฟฟ้าจริง และสามารถชดเชย ในส่วนที่เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่งด้วยการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในขณะที่ TCSC ชดเชยในส่วนที่เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่งเท่านั้น แต่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริง (ยกเว้นการสูญเสียในวงจร) กับสายส่งได้

3. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (หรือแหล่งจ่ายสำรอง) จะเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยการชดเชยทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟผสมกัน ในขณะที่ TCSC สามารถหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดยการชดเชยเฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่านั้น

4. อุปกรณ์ TCSC จะเชื่อมต่อโดยตรงกับสายส่งซึ่งต้องการติดตั้งบนลานสำหรับแรงดันสูง นอกจากนี้ระบบการทำความเย็นและการควบคุมต้องมีฉนวนที่ทนแรงดันสูงได้ ในขณะที่ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ จะเชื่อมต่อกับสายส่งผ่านทางหม้อแปลงอนุกรม และต้องการคาปาซิเตอร์สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง การติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถทำงานติดตั้งภายในอาคารและใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (โดยทั่วไปประมาณ 20 kV) นอกจากนี้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ต้องการระบบ ทำความเย็นและระบบควบคุมที่ใช้ฉนวนที่ทนแรงดันต่ำกว่า TCSC

จนถึงปัจจุบันการติดตั้งใช้งานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังไม่ปรากฏให้เห็น อย่างไรก็ตามมีการวิจัยและการศึกษาเกี่ยวกับ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ หลายบทความด้วยกัน เช่น (Han, Moon, Park, and Karady, 2000) ได้นำเสนอการศึกษาลักษณะเชิงพลวัตของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่มีแบบแผนของวงจรแปลงผัน 6 บริดจ์ซึ่งใช้ใช้การควบคุมแบบ PWM การศึกษานี้ทำการจำลองบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม EMTP ระบบไฟฟ้าที่นำมาจำลองเป็นระบบเครื่องจักร 1 ตัว เชื่อมต่อกับบัสอนันต์ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ถูกแทรกอนุกรมเข้าสายส่งโดยไม่ผ่านหม้อแปลง ซึ่งกำเนิดแรงดันเอาต์พุตที่มีเฟสต่างจากกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศา ทำการทดสอบการทำงานในโหมดของคาปาซิทีฟและอินดักทีฟ ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตของการทำงาน ทั้งในโหมดคาปาซิทีฟและอินดักทีฟได้เป็นอย่างดี ต่อมา

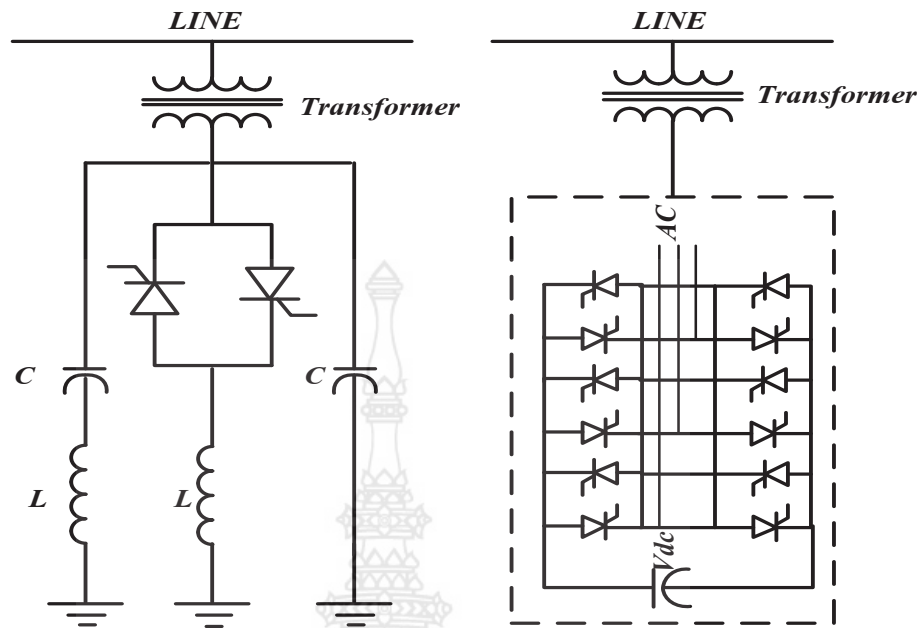
(Zhang, 2003) ได้นำเสนอแบบจำลอง กำลังไฟฟ้าที่ใช้การคำนวณแบบ Newton ซึ่งพิจารณา ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สำหรับควบคุมตัวแปรการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัว ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง แรงดันที่บัส และอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยพิจารณาการควบคุมตัวแปรที่ละตัว ซึ่งแบบจำลองนี้ได้คำนึงถึงเงื่อนไข

บังคับกระแสและแรงดันของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ด้วยการตรวจสอบได้ทำการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ Newton ที่ประกอบด้วยแบบจำลองของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ กับระบบ IEEE 30 บัส และ 118 บัส และ 300 บัส ผลจากการทดสอบพบว่าการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงด้วยวิธี Newton ที่ประกอบด้วยแบบจำลอง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ โดยใช้การคำนวณหลายรอบและมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 10-12 p.u.

(Haque, 2005) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่าง ตัวชดเชยแบบคงที่ และ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ในการปรับปรุงขีดจำกัดของเสถียรภาพ ภายใต้การพิจารณาการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบทดสอบเป็นระบบแบบเครื่องจักร 1 ตัวเชื่อมกับบัสอนันต์ ที่ประกอบด้วยตัวชดเชยแบบคงที่ และตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยแบบคงที่มีประสิทธิภาพดีกว่า ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ในการปรับปรุงเสถียรภาพการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ในคาบต่อมา และนอกจากนี้

2.3.3 ตัวควบคุมแบบขนาน

ตัวควบคุมแบบขนานจะต่อขนานกับระบบที่บัสเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.5 อุปกรณ์ชนิดนี้อาจมองว่าเป็น อิมพีแดนซ์หรือแหล่งจ่ายที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ หรือบางครั้งอาจเป็นทั้งสองอย่างพร้อมกัน หลักการทั่วไปของอุปกรณ์จำพวกตัวควบคุมแบบขนานทั้งหมดจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรักษาระดับแรงดันรอบ ๆ จุดที่เชื่อมต่อโดยอาศัยหลักการฉีดหรือดึงกระแสไฟฟ้ารีแอคทีฟเพียงอย่างเดียว แต่ในบางกรณีอาจต้องการทั้งกระแสไฟฟ้ารีแอคทีฟและกระแสจริงเพื่อผลของการควบคุมแรงดันที่ดีขึ้นและเพื่อลดการแกว่งของแรงดัน (Damping of Voltage Oscillations) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบคงที่ (Static Var Compensator: SVC) SVC ประกอบด้วยตัวรีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Control Reactor: TCR) ต่อขนานกับคาปาซิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่ (Fixed Capacitor: FC) หรืออาจต่อขนานกับคาปาซิเตอร์สวิตช์ด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Switch Capacitor: TSC) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) นอกจากนี้ อุปกรณ์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของอุปกรณ์ในจำพวกของตัวควบคุมแบบขนาน คือตัวชดเชยแบบคงที่ (Static Compensator) หรือที่นิยมเรียกกันว่า STATCOM [7,9] ซึ่งการทำงานอาศัยหลักการของตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดันเช่นเดียวกันกับ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แต่จะแตกต่างกันตรงที่จะเชื่อมต่อแบบขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข)

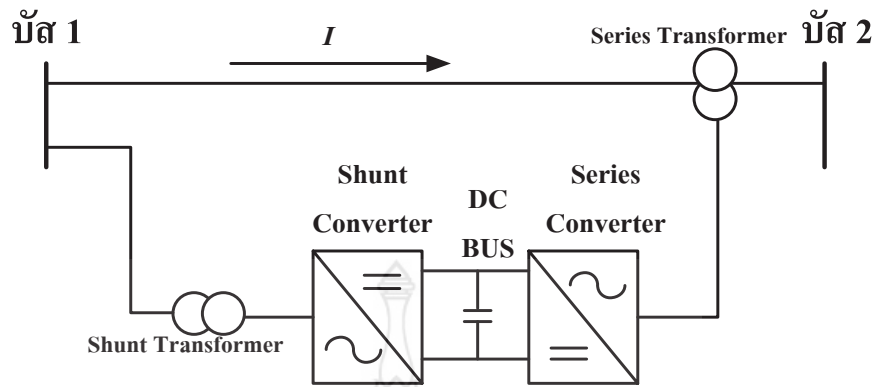


ก) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบคงที่ (ข) ตัวชดเชยแบบคงที่

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบขนาน

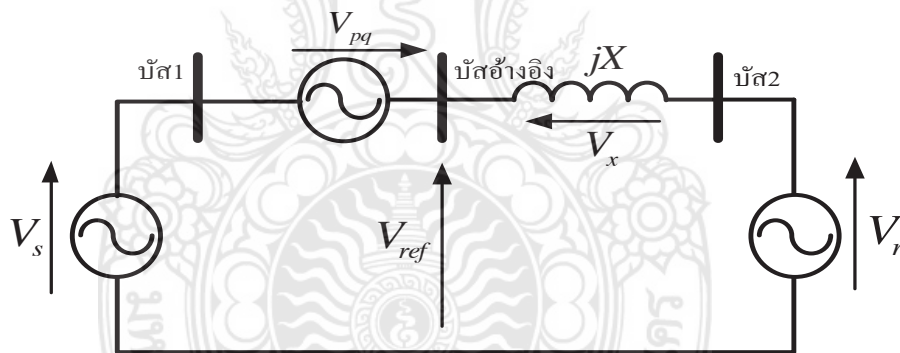
2.4 หลักการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

รูปแบบวงจรของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.9 คอนเวอร์เตอร์ขนาน (Shunt Converter) ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่บัส 1 ผ่านทางหม้อแปลงขนาน (Shunt Transformer) ทำหน้าที่จ่ายและรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และทำการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงกับคอนเวอร์เตอร์อนุกรมผ่านตัวเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนคอนเวอร์เตอร์อนุกรมถูกต่ออนุกรมเข้ากับสายส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ผ่านทางหม้อแปลงอนุกรม ซึ่งหม้อแปลงอนุกรมนี้จะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมทั้งขนาดและมุมเฟสเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่ง สำหรับชุดคอนเวอร์เตอร์ขนานสามารถใช้คอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบสองระดับ¹ หรือสามระดับ ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ใช้คอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบ สามระดับ เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์อนุกรมจะต้องปรับทั้งขนาดและมุมเฟส ในส่วนของตัวเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน รายละเอียดของ ชุดคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นว่าชุดคอนเวอร์เตอร์ของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม จะประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์สองชุดที่ใช้ Gate Turn- Off (GTO) [8] เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ชุดคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองจะทำงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าร่วมกัน

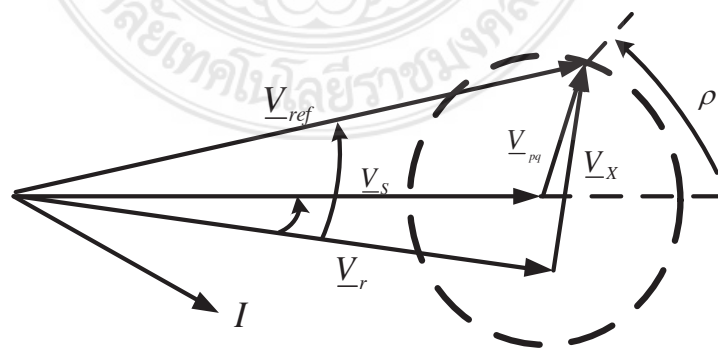


รูปที่ 2.6 แบบส่วนประกอบของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

หลักการของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถอธิบายจากวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นวงจรพื้นฐานของระบบ 2 บัสแล้วมีแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถควบคุมได้ต่อเข้าไประหว่างบัสต้นทางกับบัสปลายทาง โดยแหล่งจ่ายแรงดันนี้สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดันแทนด้วย V_{pq} ดังแสดงในเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 วงจรพื้นฐานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรพื้นฐานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

จากรูปที่ 2.8 ถ้าแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้ไม่จ่ายแรงดัน ($U_{pq} = 0$) จะได้สมการของกำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสปลายทางดังนี้

$$P_o(U_s, U_r, \delta) = \frac{U_s U_r}{X} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$Q_{ro}(U_s, U_r, \delta) = \frac{U_s U_r}{X} (1 - \cos \delta) \quad (2.2)$$

P_o คือ กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้า

Q_{ro} คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสปลายทาง

U_s คือ แรงดันไฟฟ้าของบัสต้นทาง

U_r คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสปลายทาง

X คือ ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง

δ คือ มุมเฟสระหว่างบัสต้นทางและบัสปลายทาง

เมื่อสมมติให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสต้นทางและแรงดันไฟฟ้าที่บัสปลายทางคงที่และเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) จะได้สมการดังนี้

$$P_o(\delta) = \frac{U^2}{X} \sin \delta \quad (2.3)$$

$$Q_{ro}(\delta) = \frac{U^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (2.4)$$

จากรูปที่ 2.8 ถ้าแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้นี้จ่ายแหล่งแรงดัน U_{pq} สมการของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) เขียนเป็นสมการใหม่ดังนี้

$$P(\delta, \rho) = \frac{U^2}{X} \sin \delta - \frac{UU_{pq}}{X} \cos\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) = P_o(\delta) + P_{pq}(\delta, \rho) \quad (2.5)$$

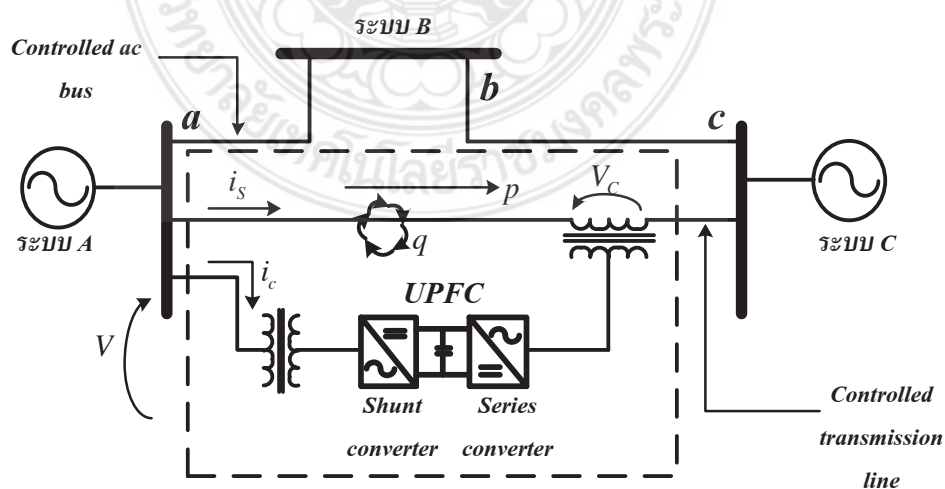
$$Q_r(\delta, \rho) = \frac{U^2}{X} (1 - \cos \delta) - \frac{UU_{pq}}{X} \sin\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) = Q_{ro}(\delta) + Q_{pq}(\delta, \rho) \quad (2.6)$$

เมื่อกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสมการที่ (2.5) และ (2.6) ในฟังก์ชันของมุมต่างเฟส, (δ) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้ และมุม (ρ)

- P คือ กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้า
- Q_r คือ กำลังไฟฟารีแอคทีฟที่บัสปลายทาง
- P_o คือ กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า
- Q_{ro} คือ กำลังไฟฟารีแอคทีฟที่บัสปลายทางที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า
- U_{pq} คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้
- ρ คือ มุมเฟสของแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้
- P_{pq} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้
- Q_{pq} คือ กำลังไฟฟารีแอคทีฟของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้

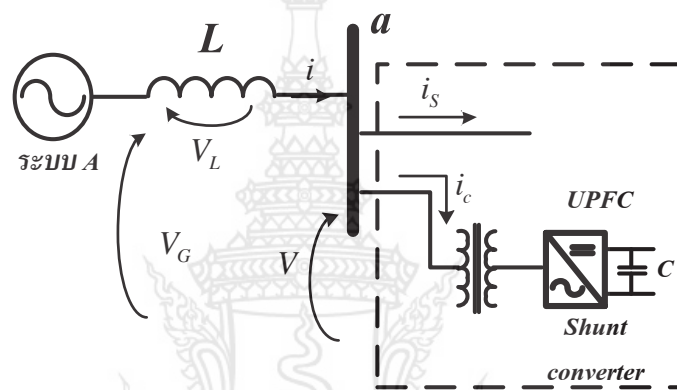
2.5 การรักษาระดับแรงดัน

คอนเวอร์เตอร์ขนานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถรักษาระดับแรงดันที่บัสควบคุม a คอนเวอร์เตอร์ขนานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม นี้สามารถกำเนิดกระแสไฟฟ้าเสมือนที่ควบคุมได้ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่ง (i_c) พิจารณาในส่วนขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก (I_{+1}) ซึ่งจะนำหน้า ($q_1 < 0$) หรือล่าหลัง ($q_1 > 0$) เป็นมุม 90° กับ เทียบกับองค์ประกอบแรงดันลำดับบวก (V_{+1}) ของแรงดันที่ควบคุมได้ (v) ถ้าให้ (i_s) เป็นกระแสของสายส่งที่สามารถควบคุมได้ที่ต่อระหว่างบัส a กับ บัส c ดังรูปที่ 2.14 จะควบคุมด้วยคอนเวอร์เตอร์อนุกรมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอคทีฟ ($p-q$) ที่ต้องการ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเสมือนที่สามารถควบคุมได้ (i_c) จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ เฉพาะกระแสที่ไหลผ่านระบบ A เปลี่ยน โดยระบบ A จะสมมติให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันต่ออยู่กับ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูล (L) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



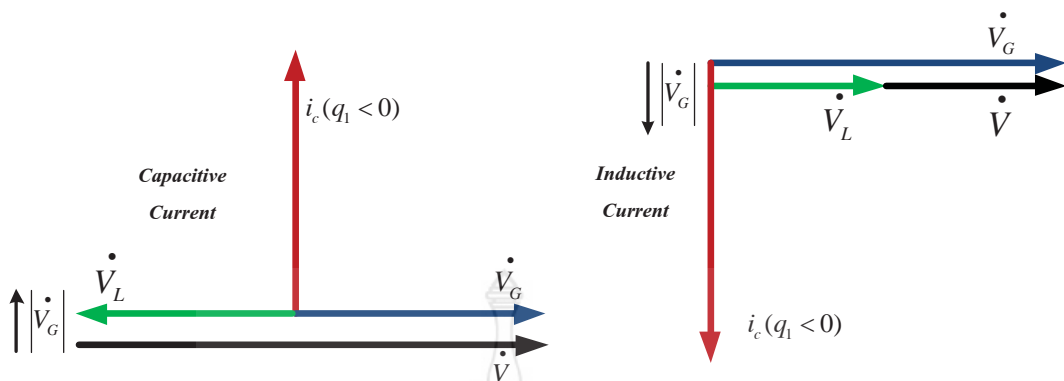
รูปที่ 2.9 การรักษาระดับแรงดันที่บัสควบคุม

รูปที่ 2.10 แสดงถึงส่วนหนึ่งของวงจรในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกระแส (i_c) จากกระแสที่ไหลผ่านค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของระบบ A รูปที่ 2.11 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรในรูปที่ 2.9 แสดงถึงการรักษาระดับแรงดันโดยการฉีดกระแส (i_c) ที่มีมุมต่างเฟสกับกับแรงดัน V ของแรงดันที่สามารถควบคุม (v) เป็นมุม 90° ถ้ากระแสชดเชย (i_c) ผลิตเฉพาะกำลังไฟรีแอคทีฟด้วยแรงดัน V เฟสเซอร์ V และ V_G ของแรงดัน (v) และ (v_G) จะมีเฟสตรงกันในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมความเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของขนาดระหว่างแรงดัน V กับ V_G



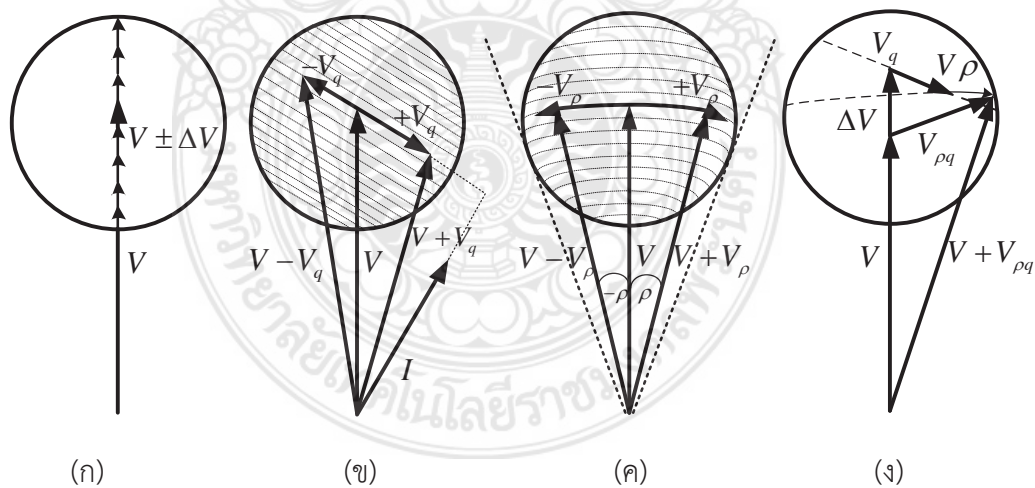
รูปที่ 2.10 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกระแส i_c

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่า V_L จะมีเฟสตรงกันกับ v ถ้า $|V| > |V_G|$ และในช่วงนี้กระแสอินดักทีฟ (i_c) จะถูกดึงจากระบบ A และในกรณีถ้า $|V| < |V_G|$ ส่งผลให้ V_L จะมีเฟสตรงกันข้าม V และในช่วงนี้กระแสคาปาซิทีฟ (i_c) จะถูกดึงจากระบบ A โดยทั่วไปแล้วกระแสรีแอคทีฟ (i_c) จะกำเนิดกำลังไฟรีแอคทีฟ ($q_1 > 0$) (บังคับให้ลดขนาดของแรงดันที่บัสที่ถูกควบคุม(บัส a) ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ขนานดึงกระแสคาปาซิทีฟ ($q_1 < 0$) จะส่งผลให้แรงดันที่บัสที่ถูกควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นจากที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นถึงหลักการประยุกต์ใช้งาน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการรักษาระดับแรงดันที่บัสควบคุม



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมการรักษาระดับแรงดันที่บัสควบคุม

การทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาบนพื้นฐานของการชดเชยแบบขนาน การชดเชยแบบอนุกรม และการรักษามุมเฟสนั้น อุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถตอบสนองทุกฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ได้ และสามารถควบคุมได้หลายวัตถุประสงค์ โดยการแทรกแรงดัน (V_{pq}) ที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและมุมเฟสเข้ากับระบบไฟฟ้า ฟังก์ชันการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถอธิบายได้โดยเฟสเซอร์ ไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 เฟสเซอร์แสดงฟังก์ชันการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของแรงดันที่แทรกเข้าไปในระบบไฟฟ้าในลักษณะที่มีเฟสตรงกันหรือตรงข้ามกันกับแรงดันของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.13(ก) ส่วนแรงดันส่วนเพิ่ม (V_{pq}) จะมีค่าเท่ากับ ($\pm\Delta V$) ที่มุมเฟสของแรงดันเป็น 0 องศา ($\rho = 0$) ฟังก์ชันการทำงานนี้ทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้

การชดเชยอิมพีแดนซ์ของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) โดยที่แรงดัน (V_{pq}) จะมีค่าเท่ากับ (V_q) จะแทรกเข้าไปในลักษณะตั้งฉากกับกระแสในสายส่ง (I) ฟังก์ชันการทำงานในลักษณะนี้จะคล้ายกับการชดเชยคาปาซิทีฟและอินดักทีฟแบบอนุกรมของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แรงดันอนุกรมนี้สามารถรักษาให้คงที่ตามต้องการโดยไม่ขึ้นกับกระแสในสายส่ง หรือสามารถเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของกระแสในสายส่งเหมือนกับการชดเชยด้วย TCSC ก็ได้

การรักษามุมเฟสแสดงในรูป (ค) โดยที่แรงดัน (V_{pq}) จะมีค่าเท่ากับ (V_p) ซึ่งแทรกเข้าไปในระบบโดยมีเฟสสัมพันธ์กันกับแรงดันอ้างอิง (V_s) เป็นมุม ρ ซึ่งมุม ρ สามารถควบคุมได้ตามต้องการโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน ดังนั้น ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมจึงสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรักษามุมเฟสได้

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในลักษณะหลายฟังก์ชันนี้สามารถทำได้โดยการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว การชดเชยอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่ง และการเลื่อนเฟสไปพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 2.13(ง) โดยที่แรงดันไฟฟ้า ($V_{pq} = \Delta V + V_q + V_p$) ซึ่งเป็นลักษณะที่โดดเด่นของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถแสดงให้เห็นละเอียดมากยิ่งขึ้นด้วยลักษณะคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ เทียบกับมุมของกำลังไฟฟ้าในสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.12 กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_r) ที่บัสปลายทางสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P - jQ_r = V_r \left(\frac{V_s + V_{pq} - V_r}{jX} \right)^* \quad (2.7)$$

โดยที่สัญลักษณ์ * หมายถึงสังยุคของจำนวนเชิงซ้อนและ $j = e^{j\pi/2} = \sqrt{-1}$ และถ้า $V_{pq} = 0$ สามารถอธิบายสมการได้ดังนี้

$$P - jQ_r = V_r \left(\frac{V_s - V_r}{jX} \right)^* \quad (2.8)$$

ถ้า $V_{pq} \neq 0$ สามารถอธิบายสมการได้ดังนี้

$$P - jQ_r = V_r \left(\frac{V_s - V_r}{jX} \right)^* + \left(\frac{V_r V_{pq}^*}{-jx} \right) \quad (2.9)$$

$$V_s = V e^{j\delta/2} = V \left(\cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.10)$$

$$V_r = V e^{-j\delta/2} = V \left(\cos \frac{\delta}{2} - j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$V_{pq} = V e^{j(\delta/2 + \rho)} = V_{pq} \left(\cos \left(\frac{\delta}{2} + \rho \right) - j \sin \left(\frac{\delta}{2} + \rho \right) \right) \quad (2.12)$$

$$P(\delta, \rho) = P_o(\delta) + P_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} \sin \delta - \frac{VV_{pq}}{X} \cos \left(\frac{\delta}{2} + \rho \right) \quad (2.13)$$

$$Q(\delta, \rho) = Q_{or}(\delta) + Q_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) - \frac{VV_{pq}}{X} \sin \left(\frac{\delta}{2} + \rho \right) \quad (2.14)$$

$$P_o(\delta) = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (2.15)$$

$$Q_{or}(\delta) = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (2.16)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่มี การชดเชยที่มุมของกำลังไฟฟ้า (δ) ที่กำหนด มุมของแรงดันชดเชย (ρ) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ ($0 \leq \rho \leq 2\pi$) ที่ทุกค่าของมุมของกำลังไฟฟ้าซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ ($0 \leq \delta \leq \pi$) ในขณะที่ $P_{pq}(\rho)$ และ $Q_{pq}(\rho)$ สามารถควบคุมได้ระหว่าง $-VV_{pq}/X$ และ $+VV_{pq}/X$ โดยไม่ขึ้นอยู่กับมุมของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ สามารถควบคุมได้โดยแสดงไว้ดังสมการ (2.17) และ (2.18)

$$P_o(\delta) - \frac{VV_{pq,\max}}{X} \leq P(\delta) \leq P_o(\delta) + \frac{VV_{pq,\max}}{X} \quad (2.17)$$

$$Q_{or}(\delta) - \frac{VV_{pq,\max}}{X} \leq Q(\delta) \leq Q_{or}(\delta) + \frac{VV_{pq,\max}}{X} \quad (2.18)$$

2.6 สรุปผลการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการทำงาน การควบคุม และการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นได้ โดยมีอุปกรณ์ที่นำเสนอ คือ ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบขนาน และตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยการทำงานของตัวควบคุมอนุกรมสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ในลักษณะการปรับค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบขนานจะอยู่ในลักษณะการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟารีแอคทีฟกับระบบโดยดูดกลืนหรือจ่ายกำลังให้กับระบบไฟฟ้าจากข้อดีของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรมและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบขนาน จำได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อนำไปจำลองการทำงานในบทที่ 3



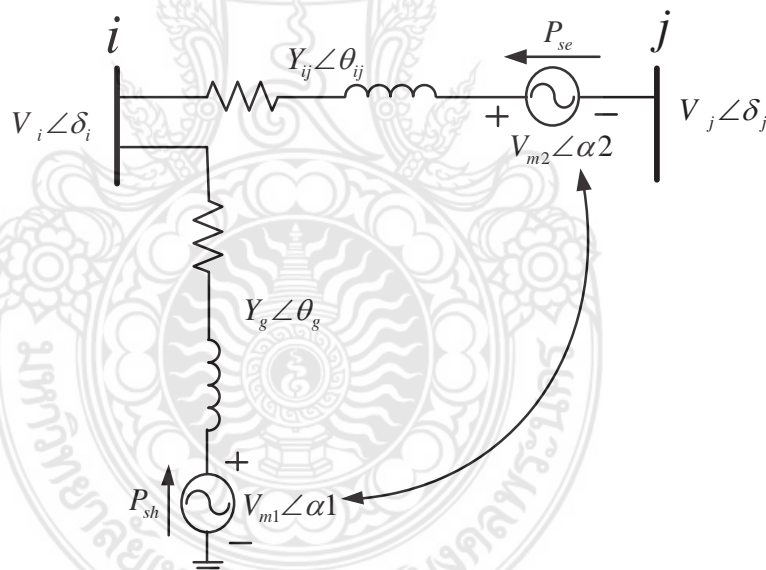
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 บทนำ

ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีความซับซ้อนมากขึ้น การควบคุมการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงมีความยุ่งยากมากขึ้นและระบบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นเพื่อศึกษาการทำงานที่สามารถควบคุมการไหลทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ บนสายส่งจึงได้จำลองการทำงานก่อนนำไปใช้งานจ่ายกำลังไฟฟ้า

จากโครงสร้างของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูล :ซึ่งอธิบายแบบจำลอง VSC ซึ่งจะแทนด้วยหม้อแปลงแบบขนานและหม้อแปลงแบบอนุกรม ด้วยอิมพีแดนซ์สมมูลต่ออนุกรมดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ตัวแปรควบคุมที่เพิ่มขึ้นจากกรณีที่ระบบไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม อีก 4 ตัว คือ $|V_{m1}|$, $|V_{m2}|$, α_1 และ α_2 ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าผ่านตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม นั้น สามารถกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่งระหว่าง บัส $i-j$ และขนาดแรงดันที่บัส i ตามที่เราต้องการ

ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ฉีดเข้าสู่บัสที่เกี่ยวข้อง และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายแรงดัน VSC ได้ดังต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ฉีดเข้าสู่บัสต้นทาง (บัส i)

$$\sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |V_{ik}| \angle \delta_i - \delta_k - \theta_{ik} + S_i^{UPFC} = S_i^G + S_i^L \quad (3.1)$$

$$S_i^{UPFC} = |V_i| |V_{m2}| |Y_{ij}| (\angle \delta_i - \alpha_2 - \theta_{ij}) + |V_i|^2 |V_g| (\angle -\theta_g) - |V_i| |V_{m1}| |V_g| (\angle \delta_i - \alpha_1 - \theta_g) \quad (3.2)$$

กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ฉีดเข้าสู่บัสปลายทาง (บัส j)

$$\sum_{k=1}^n |V_j| |V_k| |V_{jk}| \angle \delta_j - \delta_k - \theta_{jk} + S_j^{UPFC} = S_j^G + S_j^L \quad (3.3)$$

$$S_j^{UPFC} = |V_j| |V_{m2}| |Y_{ij}| (\angle \delta_j - \alpha_2 - \theta_{ij}) \quad (3.4)$$

กำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย V_{m1} จ่ายเข้าสู่ระบบ

$$P_{se} = |V_{m2}|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + |V_{m2}| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\alpha_2 - \delta_j - \theta_{ij}) - |V_{m2}| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\alpha_2 - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.5)$$

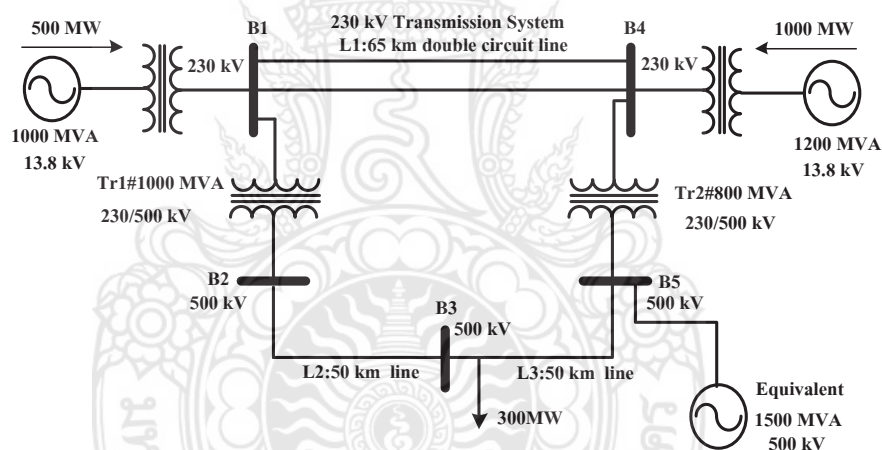
กำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย V_{m2} จ่ายเข้าสู่ระบบ

$$P_{sh} = |V_{m1}|^2 |Y_g| \cos \theta_g - |V_{m1}| |V_i| |Y_g| \cos(\alpha_1 - \delta_i - \theta_g) \quad (3.6)$$

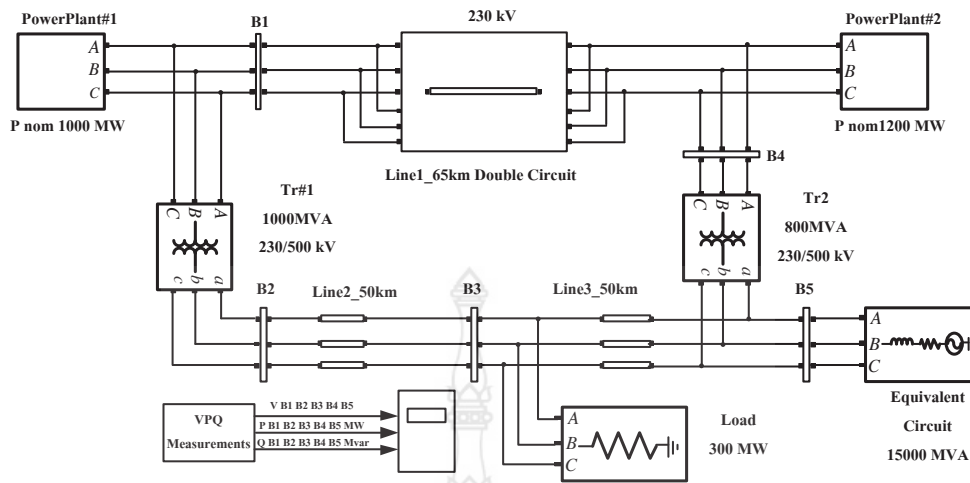
ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถควบคุมการไหลของ กำลังไฟฟ้าและรักษา ระดับแรงดันที่ติดตั้ง โดยการรักษาระดับแรงดันที่บัสที่ทำได้โดยการควบคุมของตัวควบคุมการไหล กำลังไฟฟ้าแบบรวม ในบทนี้จึงได้จำลอง แยกออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกจำลองการไหลของ กำลังไฟฟ้าโดยไม่มีตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนกรณีที่ 2 จำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยมีตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าติดตั้งเพิ่มขึ้นมาในระบบไฟฟ้ากำลัง

3.2 การออกแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า

ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนนี้จะอธิบายและวิเคราะห์ถึงแบบจำลอง การไหลกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230kV/500kV จำนวน 5 บัส ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า Tr1 ขนาด 1000 MVA 230/500kV และ หม้อแปลงไฟฟ้า Tr2 ขนาด 800 MVA 230/500kV โดยกำหนดให้โรงต้นกำลังที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่ 1 และ โรงต้นกำลังที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่ 4 มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมกัน 1500 MW โรงต้นกำลังโรงที่ 1 จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกิน 1000 MW โรงต้นกำลังที่สองจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกิน 1200 MW แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 500 kV 1500 MVA เชื่อมต่ออยู่กับบัส 4 กับบัส 5 มีโหลดขนาด 300 MW เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นแบบจำลองที่ใช้โปรแกรม MATLAB จำลองการทำงานของการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบซึ่งทำการจำลองไว้เพื่อสำหรับทดสอบสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน ก่อนติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



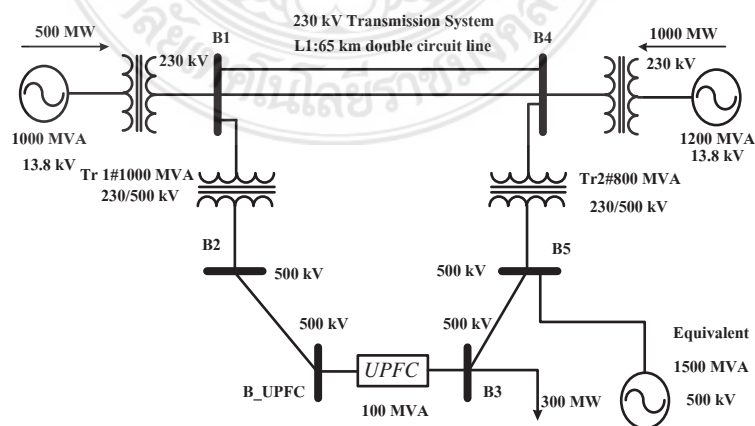
รูปที่ 3.2 แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า



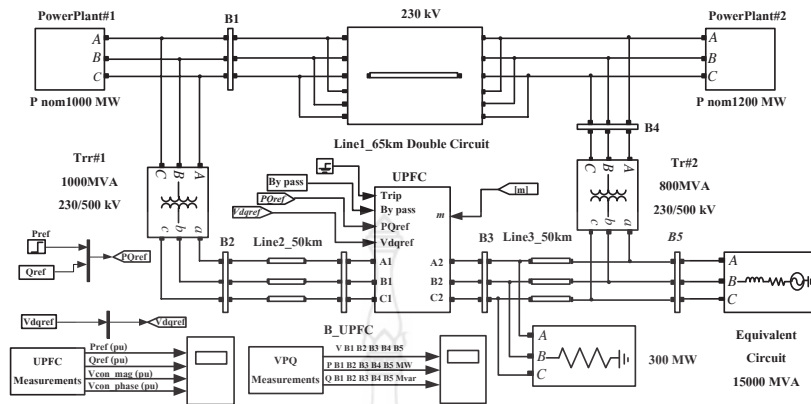
รูปที่ 3.3 แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB

3.3 การออกแบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ส่วนนี้จะอธิบายและวิเคราะห์ถึงแบบจำลอง ที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมใช้ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230kV/500kV จำนวน 5 บัส ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า Tr#1 ขนาด 1000 MVA 230/500kV และ หม้อแปลงไฟฟ้า Tr#2 ขนาด 800 MVA 230/500kV โดยกำหนดให้โรงต้นกำลังที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่ 1 และ โรงต้นกำลังที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่ 4 มีการจ่ายกำลังไฟฟารวมกัน 1500 MW โรงต้นกำลังโรงที่ 1 จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกิน 1000 MW โรงต้นกำลังที่สองจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกิน 1200 MW แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 500 kV 1500 MVA เชื่อมต่ออยู่กับบัส 4 กับบัส 5 มีโหลดขนาด 300 MW เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่ 3 เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่ 3 อุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (UPFC) ขนาด ขนาด 100 MVA เชื่อมต่อระหว่าง บัส 2 กับ บัส 3 ซึ่งมีบัสอ้างอิงคือ บัส UPFC



รูปที่ 3.4 แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 3.5 แบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมบนโปรแกรม MATLAB

ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เป็นการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์การไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม บนโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดอ้างอิงถึงค่ากำลังฟ้าจริงให้ขึ้นจาก $P_{ref}(pu)$ 5.87 เป็น 6.87 pu และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ $Q_{ref}(pu)$ -0.27 pu ในส่วนของการควบคุมค่าพารามิเตอร์ในบล็อกของอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (UPFC) คอนเวอร์เตอร์ขนานกำหนดให้มีการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าโดยอ้างอิงแรงดันไฟฟ้า V_{ref} ไว้ที่ 1 pu และอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า 0.1 pu/s และแรงดันไฟฟ้าตกได้ไม่เกิน 0.03 pu ส่วนคอนเวอร์เตอร์ขนานกำหนดให้มีการควบคุมจากภายนอก By pass breaker ในช่วงเวลาเริ่มต้นที่ 0 ถึง 5 วินาที สำหรับการฉีดแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในระบบ โดยเลือกโหมดการทำงาน เป็น Series Converter กำหนดอัตราส่วนสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ 1 pu/s โดยการกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้นที่ 5 วินาที ของ การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ให้อยู่ภายใต้การควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

3.2.1 การออกแบบตัวควบคุม

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าบัดดล (Instantaneous Power) จะใช้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (V_a, V_b, V_c) และกระแสที่ไหลในสาย (I_a, I_b, I_c) จะถูกให้แปลงอยู่บนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้การแปลงสมการแบบ Clark ดัง สมการ

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ในระบบสามเฟสจะไม่พิจารณาองค์ประกอบลำดับศูนย์

$$p = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta \quad (3.9)$$

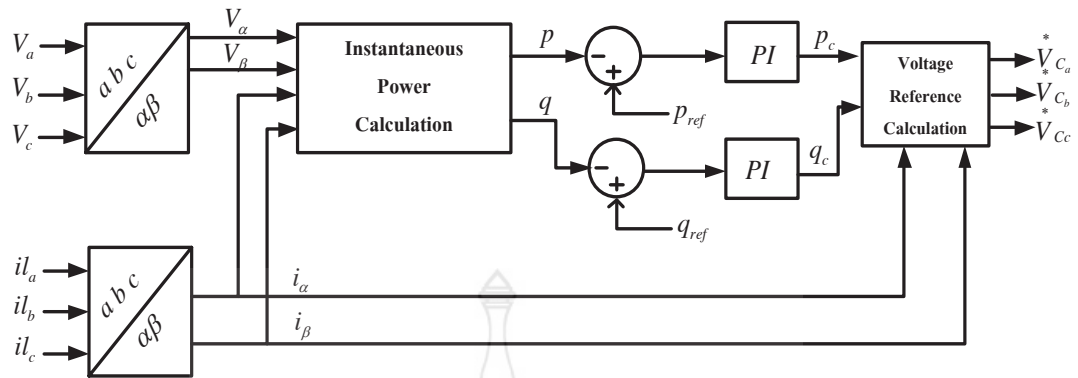
$$q = V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} V_{c\alpha}^* \\ V_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

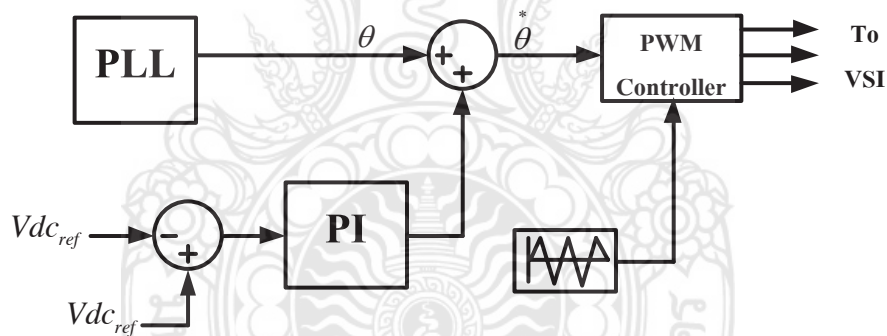
3.3.2 การควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

การควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม ประกอบด้วยชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ แรงดันชดเชยจากสมการ (3.7) ถึง (3.2) สามารถเขียนบล็อกควบคุมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บล็อกควบคุมการทำงาน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม

สำหรับการควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนานประกอบด้วย ชุดติดตามเฟสแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดกำเนิดสัญญาณ PWM ดังแสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 บล็อกควบคุมการทำงาน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน

3.4 สรุปท้ายบท

ในบทนี้แสดงให้เห็นถึงวิธีการออกแบบสร้างแบบจำลองชุดควบคุมในรูปแบบต่างๆของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม แบบจำลองชุดควบคุม โดยสร้างชุดควบคุมการไหลกำลังจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ จากนั้นจึงนำชุดควบคุมดังกล่าวไปทดสอบระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจำลองการทำงานการไหลของกำลังไฟฟ้า ก่อน และติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เพื่อนำผลค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟมาเปรียบเทียบ ความแตกต่างระหว่างก่อนหลังติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

บทที่ 4

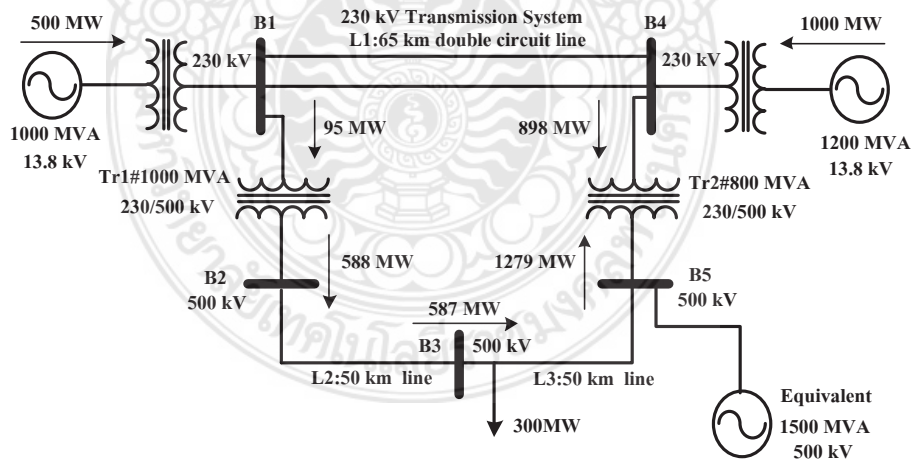
ผลการจำลองการทำงาน

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยได้ดำเนินการจำลองการทำงาน การไหลของกำลังไฟฟ้าจำนวน 5 บัส โดยแบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรกเป็นการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจำนวน 5 บัส และกรณีที่ 2 เป็นการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจำนวน 5 บัสที่มีตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวมติดตั้งอยู่ เพื่อนำผลที่มาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

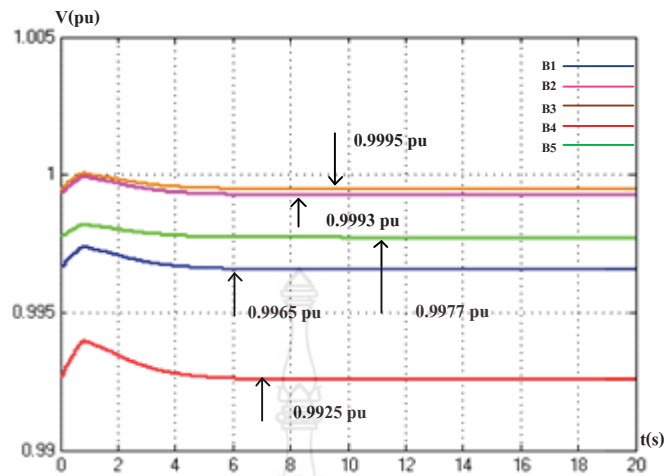
4.2 ผลจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า

ผลการจำลองการทำงานของการไหลของกำลังไฟฟ้า จะเป็นการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ที่ยังไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ระบบที่นำมาจำลองเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ เป็นระบบสายส่ง 230 kV/500 kV จำนวน 5 บัส

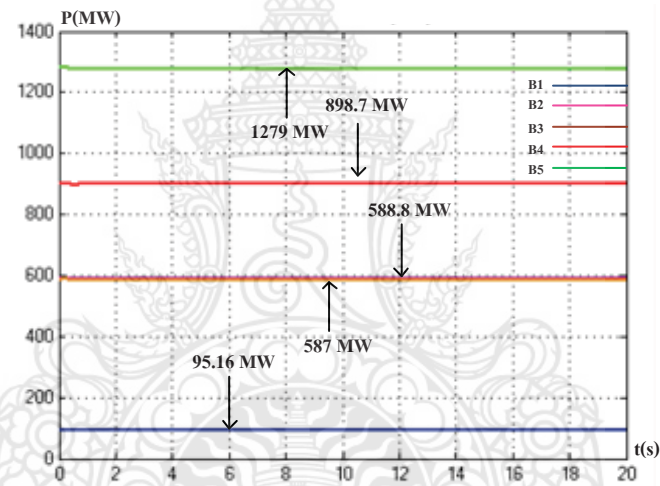


รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า

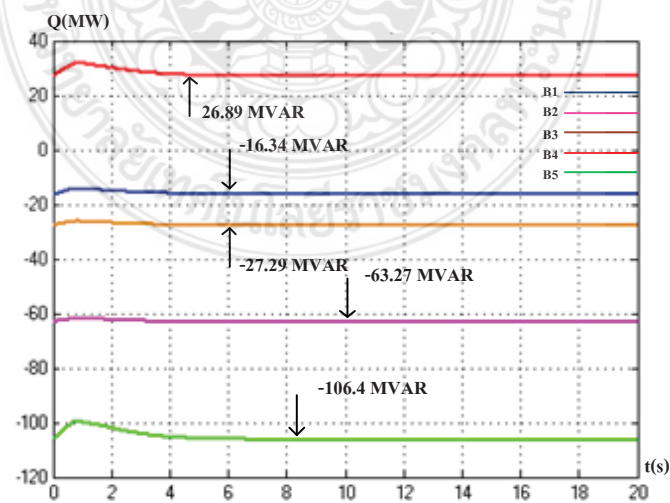
กราฟที่แสดงในรูปที่ 4.2-4.4 แสดงถึงขนาดแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ จากการทดสอบของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังจำนวน 5 บัส ที่ยังไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงก่อนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟก่อนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

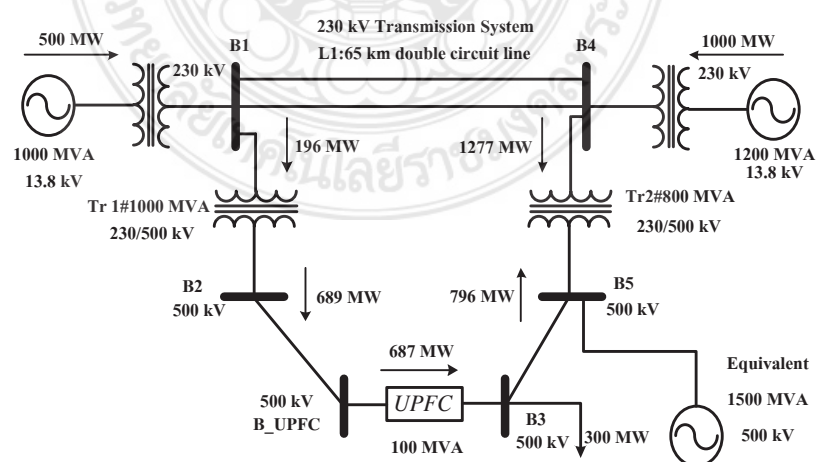
ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟารีแอกทีฟ ในแต่ละบัส โดย ผลการจำลองนี้แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจำนวน 5 บัสที่ยังไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ตารางที่ 4.1 ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ

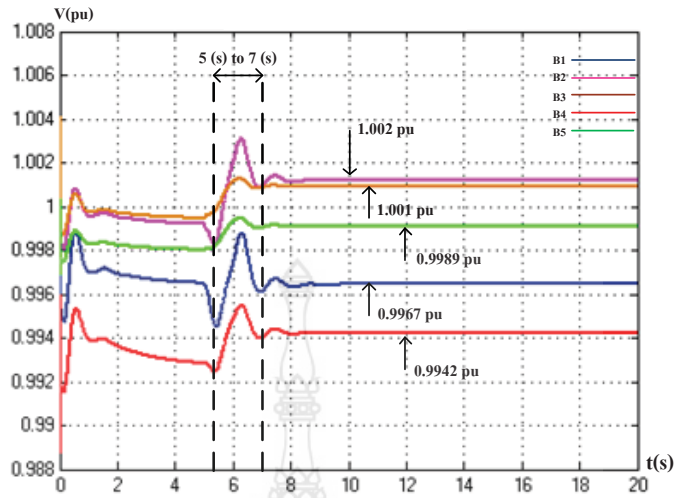
	V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
บัส 1	0.9965	95.16	-16.34
บัส 2	0.9993	588.80	-63.27
บัส 3	0.9995	587.00	-27.29
บัส 4	0.9925	898.70	26.89
บัส 5	0.9977	1279.00	-106.40

4.3 ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

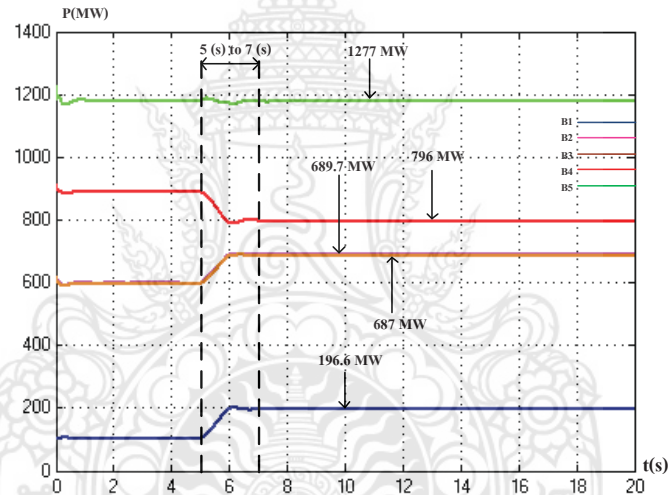
ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ส่วนนี้จะอธิบายและวิเคราะห์ทดสอบถึงแบบจำลอง ที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมใช้ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230 kV/500 kV จำนวน 5 บัส ซึ่งการทดสอบดังกล่าว เป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลง ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ที่อยู่ภายใต้การควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เพื่อศึกษาความแตกต่างของการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง จากการติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยจากการกำหนดอ้างอิงถึงค่ากำลังไฟฟ้าจริงให้ขึ้นจาก P_{ref} (pu) 5.87 pu เป็น 6.87 pu และกำลังไฟฟ้าเสมือน Q_{ref} (pu) -0.27 pu



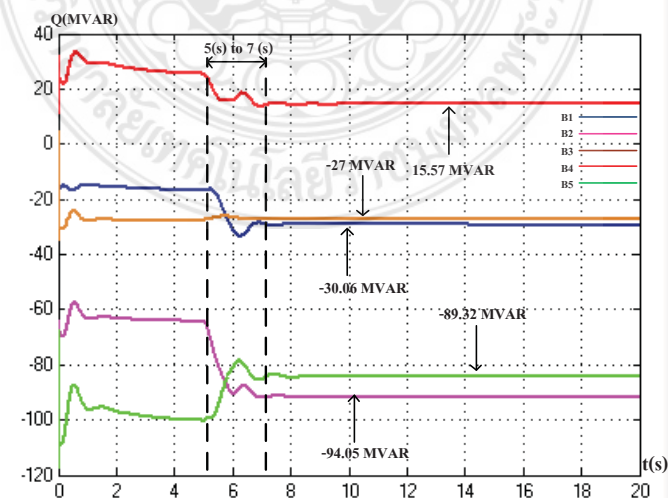
รูปที่ 4.5 ระบบทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 4.7 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 4.8 ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ดังในแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 ผลการจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าที่มีตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม แสดงถึง การเปลี่ยนแปลง ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ในบัสที่ 1 ถึง บัสที่ 5 โดยในช่วงเวลา เริ่มต้นที่ 0 ถึง 5 วินาที ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ยังไม่ขึ้นอยู่ภายใต้การควบคุมของอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เมื่อมีการควบคุมจากภายนอกช่วงเวลาเริ่มต้นที่ โดย By pass breaker open 5 วินาทีแรกให้ มีการฉีดแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในระบบ ส่งผลให้ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ อยู่ภายใต้การควบคุมของอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ ที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

	V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
บัส 1	0.9967	196.60	-30.06
บัส 2	1.002	689.70	-94.05
บัส 3	1.001	687.00	-27.00
บัส 4	0.9942	796.00	15.57
บัส 5	0.9989	1277.00	-89.32

ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟารีแอกทีฟในแต่ละบัส ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการฉีดแรงดันด้วยอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ตารางที่ 4.3 กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ ก่อนและหลังการติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

บัส	P ก่อน (MW)	P หลัง (MW)	Q ก่อน (MVAR)	Q หลัง (MVAR)
1	95	196	-23.4	-33
2	589	689	-67	-86
3	587	687	-40	-27
4	899	796	27.32	17.21
5	1279	1277	-114	-95

ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ บัสที่ 1 ถึง บัสที่ 5 เป็นผลจากการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าจำนวน 5 บัส ก่อนและหลังติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยนำค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ในตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 มาเปรียบเทียบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่เปลี่ยนแปลงจากการฉีดแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในระบบด้วยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า บัส 1 บัส 2 และ บัส 3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้นเป็น 197 MW , 690 MW , 687 MW ตามลำดับ แต่สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าจริง ในบัส 4 และ บัส 5 ที่ลดลงเป็น 796 MW , 1277 MW ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของค่ากำลังไฟฟ้าจริงนี้เป็นการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เพิ่มขึ้นของบัสอื่น ซึ่งค่าลดลงเป็นค่าที่ยอมรับได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส สำหรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในบัส 1 ถึงบัส 5 มีผลการเปลี่ยนแปลงเป็น -33 MVAR -86 MAVR -27 MVAR , 17.21 MVAR และ -95 MVAR ตามลำดับ

4.4 สรุปผลการจำลอง

การทำงานเชิงพลวัตของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยทำหน้าที่ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยทำการจำลองบนโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 1 เป็นการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม และ กรณีที่ 2 เป็นการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมติดตั้งอยู่ ซึ่งในกรณีที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีการเปลี่ยนแปลง ในช่วงเวลา 5 วินาที ถึง 7 วินาที ซึ่งความสามารถของการทำงานในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมโดยการฉีดแรงดันเข้าไปในระบบของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ต่ออนุกรม

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

การศึกษาถึงการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ เพื่อช่วยขีดความสามารถของการส่งกำลังไฟฟ้าที่มีอยู่เพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้า จึงได้นำตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม มาทดสอบกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 230 kV /500 kV โดยแบ่งการทดสอบการทำงานของกการไหลของกำลังไฟฟ้าไว้สองกรณี โดยกรณีแรกเป็นการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม และกรณีที่สองเป็นการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าติดตั้งอยู่ เพื่อนำผลที่ได้มาศึกษาและเปรียบเทียบของการไหลกำลังไฟฟ้า

5.2 สรุปผล

5.2.1 ผลการศึกษาการทำงานของชุดการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้แบ่งออกได้ 3 ชนิด คือตัวควบคุมแบบอนุกรม เช่น TCSC,SSSC ตัวควบคุมแบบขนานเช่น SVC,STATCOM และตัวควบคุมแบบผสม เช่น UPFC,IPFC,HVDC :ซึ่งในการควบคุมแต่ละวิธีจะมีความสำคัญที่แตกต่างกันไป สำหรับในงานวิจัยนี้มุ่งประเด็นที่หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน เพื่อควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นวิธีการของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมจึงถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ สำหรับส่วนประกอบหลักของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมมีหลักการพื้นฐานดังนี้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ต่อขนานทำหน้าที่จ่ายและดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงจากอุปกรณ์เชื่อมโยงกระแสตรงและส่งกำลังไฟฟ้าจริงกลับไปยังระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่บัสเชื่อมต่อ อีกส่วนหนึ่งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรมสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับในอุดมคติที่มีความสามารถในการจ่ายหรือดูดกลืนได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในการทำงานนั้นตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรมจะทำงานเป็นหน้าที่หลัก โดยการแทรกแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ขนาดและมุมเฟสเข้ากับสายส่งผ่านทางหม้อแปลงอนุกรมซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่แทรกเข้าไปนี้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบซิงโครนัส ที่สำคัญ กระแสไฟฟ้าของสายส่งที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า นี้จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้นี้กับระบบ

ไฟฟ้าโดยที่กำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกกำเนิดขึ้นภายในวงจรแปลงผัน ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงที่แลกเปลี่ยนกับระบบไฟฟ้าจะถูกแปลงผันมาจากกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่จุดเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง ในส่วนการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ต่อขนาน จะทำหน้าที่จ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบเชื่อมโยงกระแสตรง ตามความต้องการของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรมเพื่อสนับสนุนการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรม โดยความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงนี้จะได้จากจุดเชื่อมโยงกระแสตรงถูกแปลงผันกลับไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้วย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนานผ่านทางหม้อแปลงขนาน นอกจากนี้แล้ว ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนานผ่านทางหม้อแปลงขนาน นอกจากนี้แล้วตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนานยังสามารถดูดกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควบคุมได้ตามต้องการ

5.2.2 ผลการศึกษาการทำงานของชุดการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

จากการนำชุดควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ที่ได้ทำการออกแบบไปทดสอบกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 230 kV/500 kV จำนวน 5 บัส พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนหลังจากการติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม มีการเปลี่ยนแปลงจากการฉีดแรงดันด้วยอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 3 เพิ่มขึ้น จาก 587 MW เป็น 687 MW นั้นสามารถเริ่มชดเชยแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบได้ ในเวลาเริ่มต้น ที่เวลา 5 วินาที เป็นต้นไป สำหรับชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้า นี้ใช้เวลา ในเวลา 1 ถึง 2 วินาที หลังจาก 5 วินาทีแรก ที่ระบบไฟฟ้าอยู่ภายใต้การควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยการแทรกแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมขนาดและมุมเฟสเข้ากับหม้อแปลงอนุกรมผ่านสายส่งเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง

5.3 ข้อเสนอแนะ

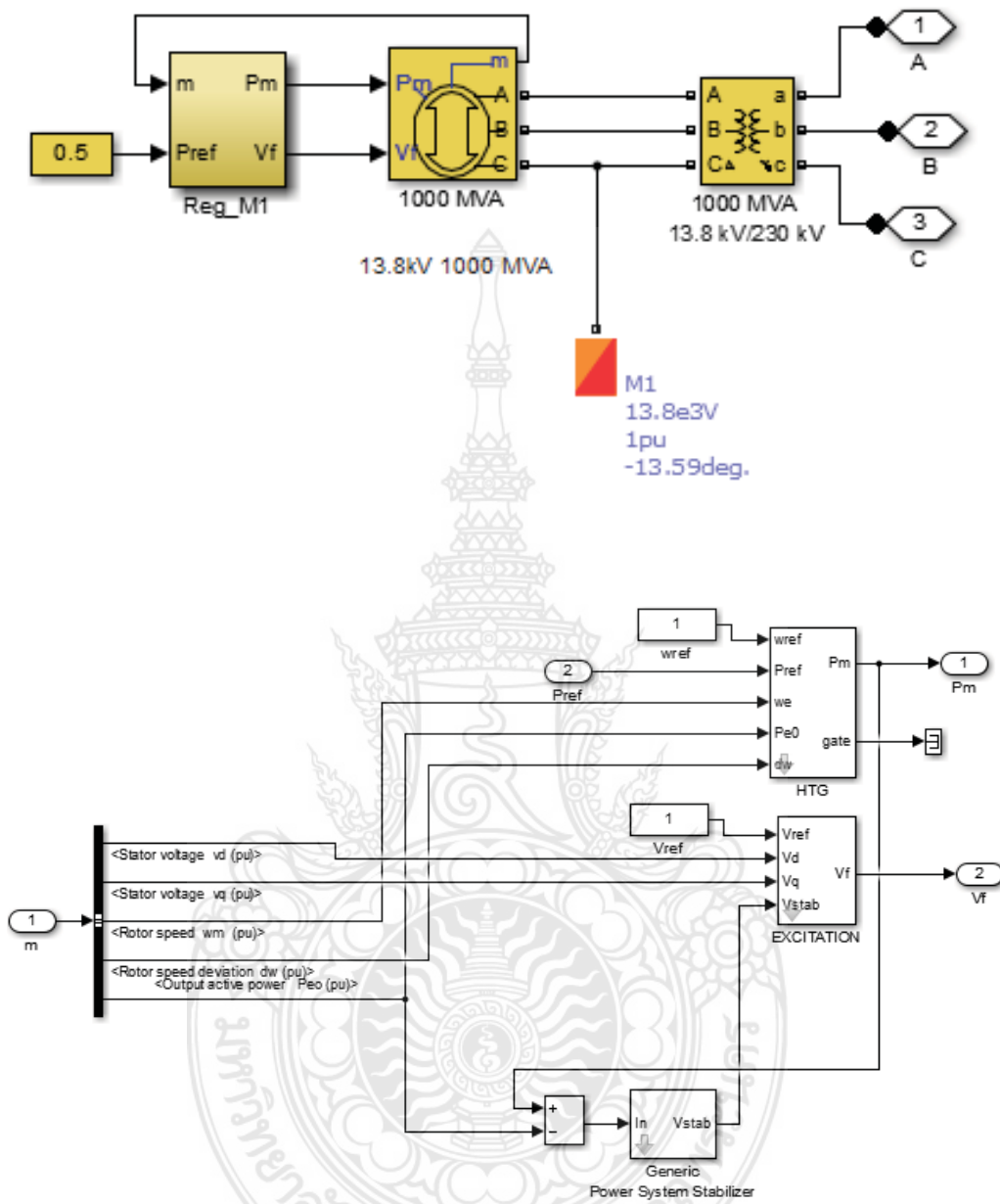
ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ออกแบบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยการจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบ 3 เฟส 230 kV/500 kV โดยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกำหนดให้คงที่ ดังนั้นเมื่อทดสอบระบบการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนและติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม จะพบความแตกต่างของค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน แต่ยังไม่สามารถพิจารณาถึงผลการทำงานที่อาจส่งผลในการออกแบบตัวอุปกรณ์ที่นำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ เช่น การปรับปรุงตัวประกอบกำลังการเกิดค่า ฮาร์มอนิกส์ หรือเกิดค่า สูญเสียหรืออื่นๆดังนั้นควรวิจัยในส่วนงานนี้ต่อไป

บรรณานุกรม

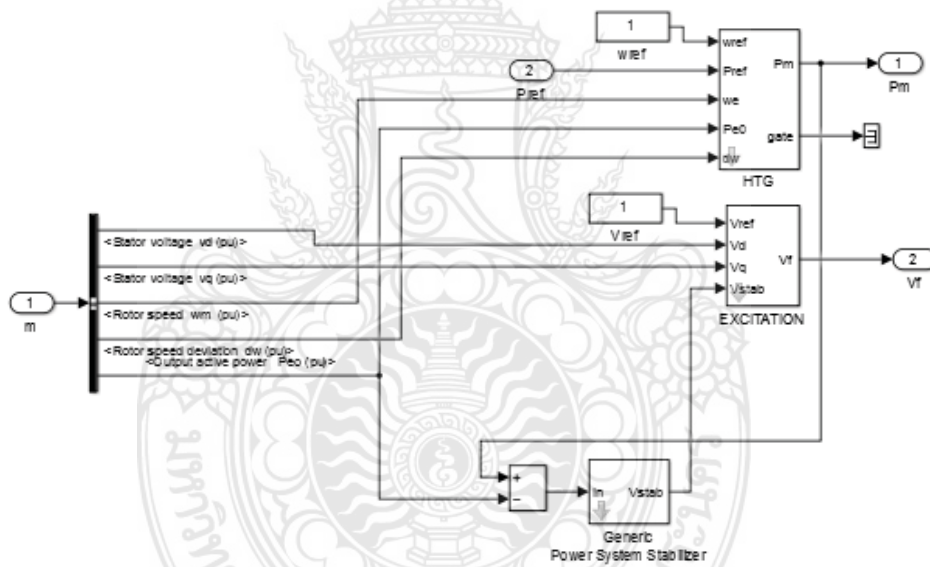
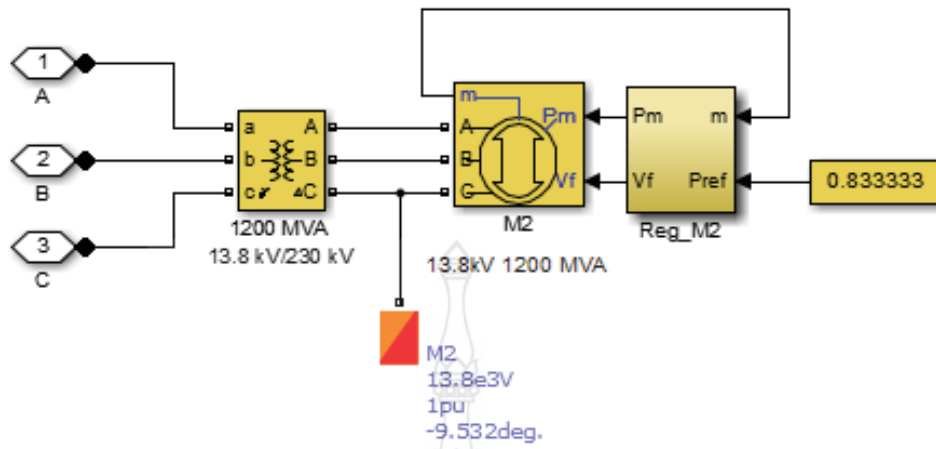
- [1] I. Papic, P. Zunko, D. Povh, and M. Weinhold, “Basic control of unified power flow controller,” IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, no 4, pp. 1734, November 1997.
- [2] N. F. Mailah, S.M. Bashi, N. Mariun, and I. Aris, “Simulation of a three-phase multilevel unified power flow controller UPFC,” in Journal of Applied Sciences 8(3), pp.503-504, 2008.
- [3] K. K. Sen and Eric J. Stacey, “UPFC-unified power flow controller theory modeling and applications,” in IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13,no 4, pp.1453, October. 1998.
- [4] Y. Xiao, Y.H. Song, and Y.Z. Sun, “Power flow control approach to power systems with embedded FACTS devices,” IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, no 4, pp. 943-944, November 2002.
- [5] K. M. Son, and R. H. Lasseter, “A newton-type current injection model of upfc for studying low-frequency oscillations,” IEEE Trans. on Power Delivery, vol.19, no 2, pp.694-695, April 2004.
- [6] K. K. Sen, “SSSC-Static synchronous compensator theory modeling and applications,” IEEE Trans. on Power Delivery, vo. 13. , no 1, pp.241-242, January 1998.
- [7] วิทยา สุริยาสกล: 2552, การศึกษาตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/EMTP, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [8] S. Kannan, S. Jayaram, and M. M. A. Salama, “Real and reactive power coordination for a unified power flow controller,” IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, no 3, pp. 1455-1457, August 2004.
- [9] P. K. Dash, K. P. Basu , and A. M. Sharaf, “UPFC controller design for power system stabilization with improved genetic algorithm,” Industrial electronics society, IECON 03.The 29th 2003 Annual conference of the IEEE, vol. 2 , pp.1541

ภาคผนวก ก.
ลายละเอียดแบบจำลอง

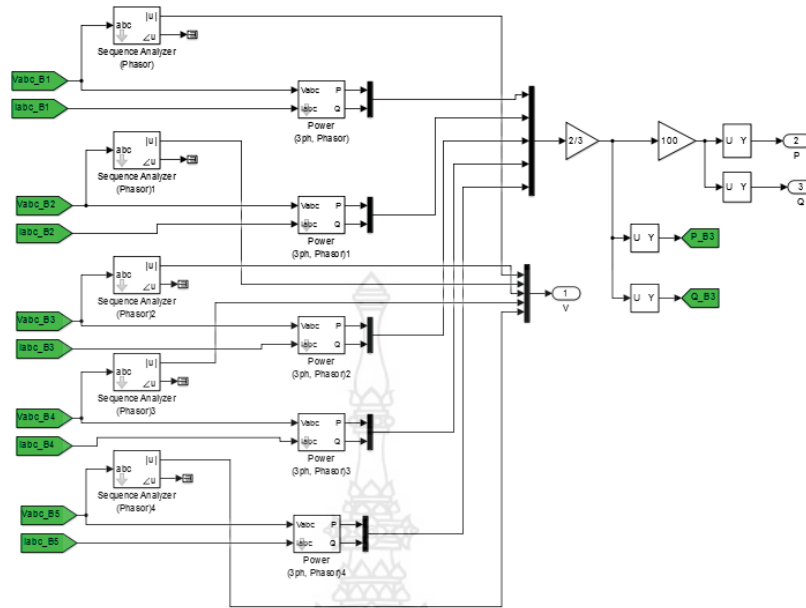




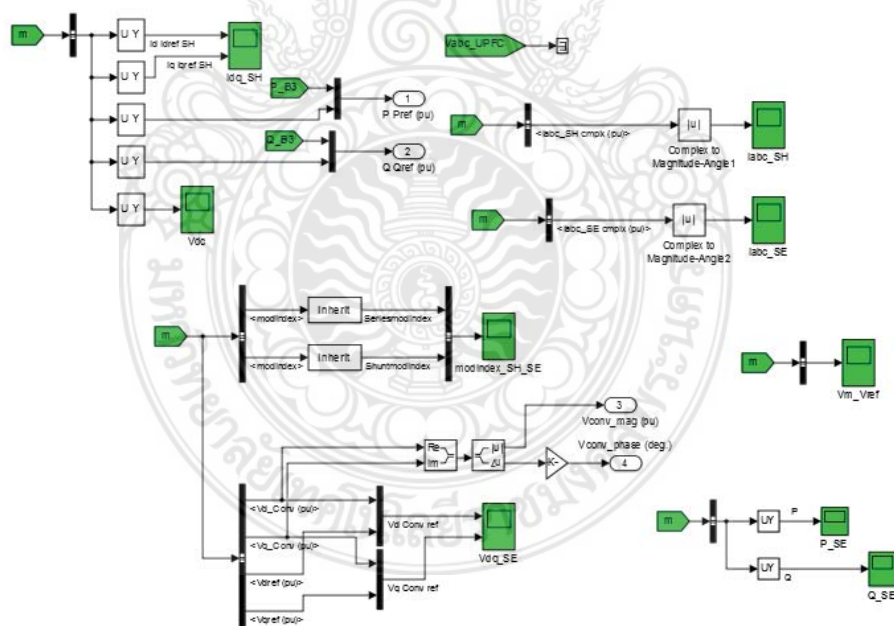
รูปที่ ก.1 ชุดโรตันทันกำลังขนาด 1000 MW



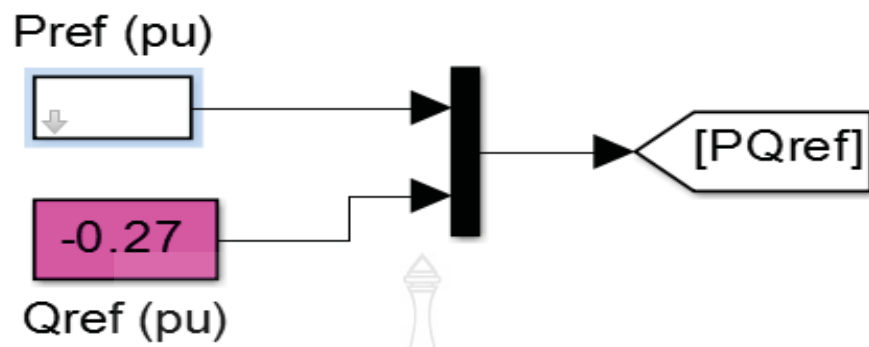
รูปที่ ก.2 ชุดโรงต้นกำลังขนาด 1200 MW



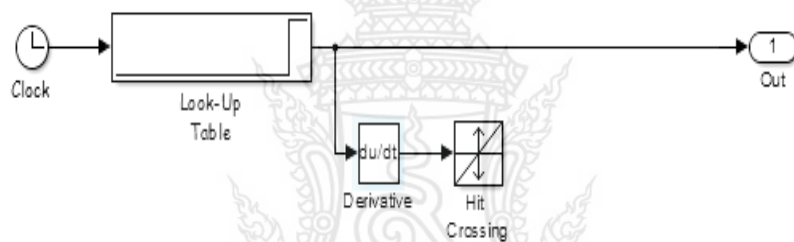
รูปที่ ก.3 รายละเอียดชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส



รูปที่ ก.4 รายละเอียดชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่ติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



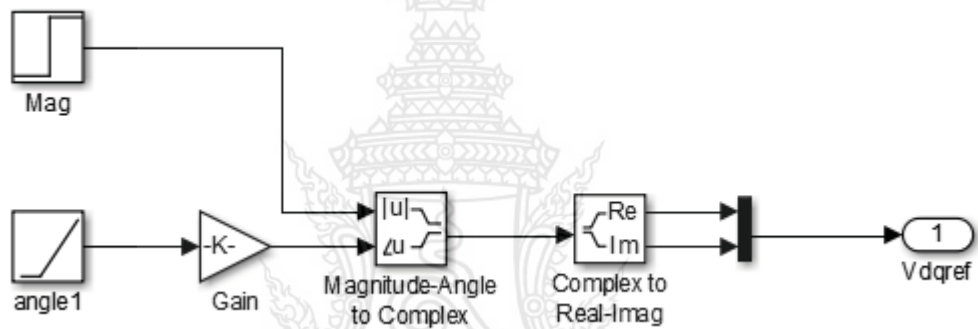
รูปที่ 3.5 รายละเอียดแบบจำลองกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ



รูปที่ 3.6 รายละเอียดแบบจำลองควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ



รูปที่ ก.7 รายละเอียดแบบจำลองการฉีดแรงดันไฟฟ้าเข้าในระบบ



รูปที่ ก.8 รายละเอียดแบบจำลองการควบคุมการฉีดแรงดันไฟฟ้าเข้าในระบบ

ประวัติผู้วิจัย



1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายมนัส บุญเที่ยรทอง
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Manat Boonthienthong
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 4-1602-00001-01-1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทรศัพท์ 02-8363000 ต่อ 4150 โทรสาร 02-8363000 ต่อ 4151
E-mail: manat.b@rmutp.ac.th โทรศัพท์ 0819112597
5. ประวัติการศึกษา
ปริญญาเอก ปร.ด.(เทคโนโลยีเทคนิคศึกษา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปริญญาโท ค.อ.ม.(เทคโนโลยีเทคนิคศึกษา) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 - ความปลอดภัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้า
 - เทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

คณะผู้วิจัย



1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายรัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Nattachote Rugthaicharoencheep
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1005-01399-90-2
3. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
4. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทรศัพท์ 02-8363000 ต่อ 4150 โทรสาร 02-8363000 ต่อ 4151
E-mail: nattachote.r@mutp.ac.th โทรศัพท์ 0613536426
5. ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก	ปร.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปริญญาโท	วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปริญญาตรี	วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปริญญาตรี	คอ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 - การจัดการด้านอนุรักษ์พลังงาน
 - การตรวจสอบความปลอดภัยในอาคารควบคุม