

การศึกษาตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วย
โปรแกรม ATP/EMTP

**STUDY OF UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER FOR TRANSMISSION LINE
SYSTEM BY USING ATP/EMTP PROGRAM**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

2552

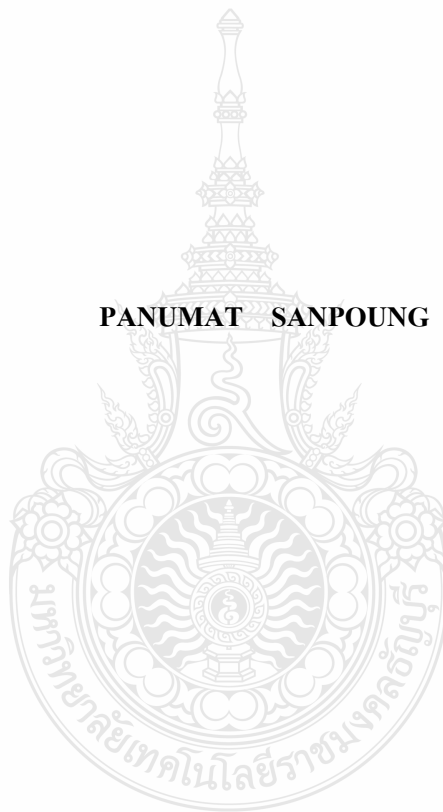
การศึกษาตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้า
ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ.2552

**STUDY OF UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER FOR TRANSMISSION LINE
SYSTEM BY USING ATP/EMTP PROGRAM**

PANUMAT SANPOUNG



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

2009

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ใน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

ภานุมาศ แสนพวง





ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/EMTP
STUDY OF UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER FOR TRANSMISSION LINE SYSTEM USING ATP/EMTP PROGRAM

ชื่อนักศึกษา นายภานุมาศ แส่นพวง
รหัสประจำตัว 114970402008-4
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ไพศาล บุญเยี่ยม
วัน เดือน ปี ที่สอบ 3 ตุลาคม 2552 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ห้องชมพูนุพัชร์ทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.ประมุข อุณหเลขกะ)

..... กรรมการ
(ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์)

..... กรรมการ
(ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม)

..... กรรมการ
(ดร.ไพศาล บุญเยี่ยม)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/EMTP
นักศึกษา	นายภานุมาศ แสนพวง
รหัสประจำตัว	114970402008-4
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.ไพศาล บุญเยี่ยม

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีการขยายตัวและซับซ้อนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพและความมั่นคงกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถส่งเสริมเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดี

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด ซึ่งได้ศึกษาการทำงานในสถานะชั่วคราว เนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะของระบบ ในส่วนของการควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมใช้ทฤษฎีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนบดคล และทำการออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการ Modulus Optimum โดยอาศัยพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากการทดสอบผลตอบสนองของฟังก์ชันขั้นบันได โดยจำลองการทำงานภายใต้การควบคุมดังกล่าวบนโปรแกรม ATP/EMTP

การจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำลองที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสองตัว ผลการจำลองแสดงถึงตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสามารถควบคุมให้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลกลับทางได้ โดยการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าอีกบัสหนึ่งให้มากกว่าอีกบัสหนึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีมูมนำหน้าและล่าหลังแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนถูกควบคุมให้เป็นบวกหรือลบได้ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่แยกอิสระต่อกัน นอกจากนี้ยังสามารถรักษาระดับแรงดันเนื่องจากการเกิดแรงดันตกชั่วขณะได้ และให้ผลตอบสนองต่อการควบคุมได้อย่างรวดเร็ว

คำสำคัญ : ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม, ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนบดคลแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ

Thesis Title: STUDY OF UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER FOR TRANSMISSION LINE SYSTEM BY USING ATP/EMTP PROGRAM

Student Name: Mr. Panumat Sanpoung

Student ID: 114970402008-4

Degree Award: Master of Engineering

Study Program: Electrical Engineering

Academic Year: 2009

Thesis Advisor: Dr. Paisan Boonchiam

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 unified power flow controller (UPFC) is the equipment, which can control the flow of real power and reactive power rapidly. In addition, it can gladly encourage the stability and reliability of the power transmission line system.

In this thesis, the study of UPFC for transmission line system in the case of an application for the power flow for real power and reactive power for Transient State were investigated. Furthermore, an application for UPFC for control voltage at load since voltage sag occurred. The UPFC using the equation of the instantaneous pq-theory and designed to find out parameter by PI-theory with modulus optimum method. This method can be tested from the step testing respond parameters with using ATP/EMTP program.

Simulation result are shown that, the control of bus voltage is proposed for power control by using lag and lead angle control of line current real and reactive power are control bolt positive and negative that can the performance of UPFC. Moreover the UPFC can be immediately used to compensate voltage sag.

Keywords: Unified Power Flow Controller, Instantaneous p-q Theory, Voltage Sag

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี กระจมใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร.ไพศาล บุญเยี่ยม อาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งท่านได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นแรงบันดาลใจในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม ซึ่งได้สละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบและได้ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะและให้ความรู้ในการศึกษาแนวทางที่ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้กระผมมีโอกาสในการพัฒนาตัวเองและการสนับสนุนในทุกด้านจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ นายกฤตยา สมสัย ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ นายเจษฎา พรหมเกษ นายอากาศพล มหาวิระ ที่ร่วมแรง ร่วมใจและความช่วยเหลือทุกอย่างตลอดการเดินทางจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณ พี่ รุ่งน้อง เพื่อนๆ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในทุกด้าน ขอขอบคุณ พี่ รุ่งน้อง เพื่อนๆ ณ ห้องวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และคนรอบตัวผู้วิจัยทุกๆ คน สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณที่ทำให้วันและเวลาของผู้วิจัยผ่านไปอย่างมีคุณค่า

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่สนับสนุนทางการเงินและเป็นกำลังใจ และขอขอบคุณ นางสาวเพชรรัตน์ ใจบุญ ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจที่ดีแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ภานุมาศ แสนพวง

20 ตุลาคม 2552

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
C_{dc}	ตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงานที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง
C_f	ตัวเก็บประจุวงจรกรอง
f_{sw}	ความถี่การสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์
G_{CI}	ฟังก์ชันถ่ายโอนของ ตัวควบคุม PI ของกระแส
G_{Cloop}	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของ กระแสป้อนกลับบนแกน dq
G_{dc_Cloop}	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของวงรอบแรงดันกระแสตรง
G_{PI}	ฟังก์ชันถ่ายโอนกระแส
$i_{cd}^*, i_{cq}^*, i_{co}^*$	ค่ากระแสอ้างอิงที่แกน dqo
i_{dc}	กระแสที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง
i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}	กระแสค่านอกจากคอนเวอร์เตอร์หรือที่จุดPCC
KP_i	ค่าพารามิเตอร์ตัวชดเชย P ของกระแส
KI_i	ค่าพารามิเตอร์ตัวชดเชย I ของกระแส
KP_v	ค่าพารามิเตอร์ตัวชดเชย P ของแรงดัน
KI_v	ค่าพารามิเตอร์ตัวชดเชย I ของแรงดัน
f_L	ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
m_a, m_b, m_c	ค่าสัญญาณการมอดูเลชันของเฟส a, b และ c
m_d, m_q, m_o	ค่าสัญญาณการมอดูเลชันของบนแกน d, q และ o
R_{dc}	ตัวต้านทานที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง
R_f	ตัวต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรอง
R_F	ตัวต้านทานวงจรกรอง
R_{Line}, L_{Line}	ความต้านทาน และความเหนี่ยวนำในสายส่ง
t_n	เวลาที่ทำการสุ่มค่าปัจจุบัน
T_s	คาบเวลาในการสุ่มข้อมูล
v_d, v_q, v_o	แรงดันบนแกน d, q และ o
v_d^+, v_q^+, v_o^+	แรงดันบนแกน d, q และ o ที่องค์ประกอบลำดับบวก
v_d^-, v_q^-, v_o^-	แรงดันบนแกน d, q และ o ที่องค์ประกอบลำดับลบ
v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}	แรงดันค่านอกจากคอนเวอร์เตอร์หรือที่จุดPCC

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
v_{inv}, i_{inv}	แรงดัน และกระแสอินเวอร์เตอร์
$v_{p(t)}$	แรงดันลำดับบวกที่เวลาใดๆ
$v_{n(t)}$	แรงดันลำดับลบที่เวลาใดๆ
v_{α}, v_{β}	แรงดันบนแกน α, β
V_{PCC}	แรงดันไฟฟ้าของระบบที่จุดเชื่อมต่อ
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่เฟส A, B และ C
V_{sag}	แรงดันขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ
V_{pre}	แรงดันก่อนเกิดแรงดันตกชั่วขณะ
U_{pq}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้
P	กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้า
Q_r	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทาง
Q_{ro}	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทางที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า
ρ	มุมเฟสของแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้
P_{pq}	กำลังไฟฟ้าจริงของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้
Q_{pq}	กำลังไฟฟ้าเสมือนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้
P_o	กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้า
Q_{ro}	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทาง
U_s, V_1	แรงดันไฟฟ้าของบัสต้นทาง
U_r, V_2	แรงดันไฟฟ้าที่บัสปลายทาง
V_L	แรงดันไฟฟ้าที่โหลด
$V_r, V_{term}, V_{terminal}$	แรงดันไฟฟ้าที่จั่ว
X	ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง
δ	มุมเฟสระหว่างบัสต้นทางและบัสปลายทาง
\varnothing	มุมเฟสระหว่างแรงดันก่อนและขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ
γ	มุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแส
θ	มุมเฟสของแรงดัน
ω_o	ความถี่ตัดข้าม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

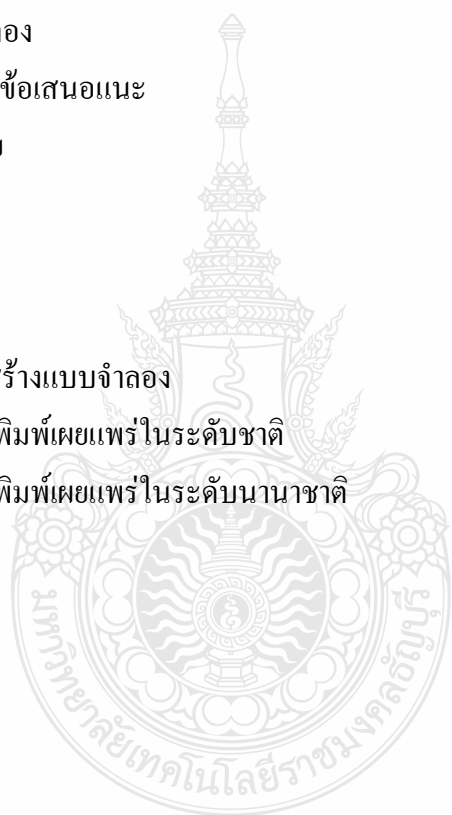
สัญลักษณ์	ความหมาย
ω_{cn}	ความถี่หักมุม
$\Delta\theta$	การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันสเปซเวกเตอร์
คำย่อ	ความหมาย
ATP/EMTP	Alternative Transient Program/ Electro Magnetic Transient Program
APF	Active power filter
EPRI	Electric Power Research Institute
FACTS	Flexible AC Transmission System
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
HVDC	High Voltage Direct Current
IPFC	Interline Power Flow Controller
IGBT	Insulate Gate Bipolar Transistor
KVL	Kirchoff's voltage law
KCL	Kirchoff's current law
PI	Proportional plus integral
PLL	Phase-locked-loop
PWM	Pulse width modulated
RMS	Root-mean-square
SPWM	Sinusoidal pulse width modulation
SRF	Synchronous reference frame
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Compensator
SVC	Static VAR Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Compensator
TCR	Thyristor Control Reactor
TSC	Thyristor Switch Capacitor
TF	Transfer function
UPFC	Unified Power Flow Control
VSC	Voltage Sourced Convertor

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	4
1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษา	5
1.7 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบส่งกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้	7
2.3 หลักการทำงานเบื้องต้นของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	17
2.4 หลักการรักษาระดับแรงดัน	21
2.5 สรุปผลการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	28
3.1 บทนำ	27
3.2 แบบจำลองแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส	30
3.3 การจำลองตัวชดเชย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน	31
3.4 การจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม	35
3.5 การออกแบบตัวชดเชย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมควบคุมการไหล ของกำลังไฟฟ้า	38
3.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของตัวควบคุมการไหล กำลังไฟฟ้า	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การออกแบบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดัน	48
3.8 สรุปท้ายบท	51
บทที่ 4 ผลการจำลองการทำงานตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	52
4.1 การจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน	43
4.2 การจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม	56
4.3 การจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	60
4.4 การจำลองการชดเชยแรงดัน	64
4.5 สรุปผลการจำลอง	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	
ก.รายละเอียดการสร้างแบบจำลอง	72
ข.บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติ	82
ค.บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ	89
ประวัติผู้เขียน	101



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

ก.1 พารามิเตอร์ของระบบในการจำลองการทำงาน

79



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	3
2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม	9
2.2 โครงสร้างของตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่	10
2.3 ระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน	10
2.4 ระบบที่ติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน	11
2.5 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบขนาน	14
2.6 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม – อนุกรม	14
2.7 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม – ขนาน	15
2.8 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมขนาน – ขนาน	17
2.9 แบบส่วนประกอบของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	18
2.10 วงจรพื้นฐานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในระบบส่งกำลังไฟฟ้า	18
2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรพื้นฐานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในระบบไฟฟ้ากำลัง	19
2.12 ลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน	20
2.13 การเปลี่ยนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกแตนซ์ในฟังก์ชันของการควบคุม มุมของแรงดันไฟฟ้า ρ	21
2.14 การรักษาระดับแรงดันที่บัสควบคุม	22
2.15 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกระแส i_c	22
2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของรูปที่ 2.14	23
2.17 เฟสเซอร์แสดงฟังก์ชันการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	24
2.18 กำลังไฟฟ้าที่มีการชดเชยเทียบกับมุมของกำลังไฟฟ้า δ	26
3.1 วงจรสมมูลของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	27
3.2 วงจรแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม	30
3.3 โครงสร้างและการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน	32
3.4 ไดอะแกรมหลักการของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน	33
3.5 ไดอะแกรมระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน	35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การเชื่อมต่อ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรมเข้ากับระบบ เพื่อป้องกันโหลดจากแรงดันตก/เกินช่วงสั้น	36
3.7 โครงสร้างตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม	36
3.8 วงจรของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรมและการเชื่อมต่อกับระบบ	37
3.9 ระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม	37
3.10 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า	38
3.11 วงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมที่ใช้ในการจำลอง	38
3.12 บล็อกควบคุมการทำงานตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรม	39
3.13 บล็อกควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน	40
3.14 รูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุตจากการทดสอบด้วยวิธีการของฟังก์ชันขั้นบันได	41
3.15 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	43
3.16 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง	45
3.17 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน	47
3.18 โครงสร้างระบบที่ใช้ในการจำลองการชดเชยแรงดัน	49
3.19 วงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดัน	49
3.20 ชุดควบคุมกระแสสำหรับตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน	50
3.21 ชุดควบคุมสำหรับตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม	51
4.1 ระบบทดสอบการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน	52
4.2 แรงดันที่บัสเชื่อมต่อ	53
4.3 ขนาดและมุมเฟสของสัญญาณไซน์อ้างอิง	54
4.4 กำลังไฟฟ้าเสมือน	54
4.5 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	55
4.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ที่เวลา 0.9-1.15 วินาที	55
4.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ที่เวลา 2.95-3.1 วินาที	56
4.8 ระบบทดสอบการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แรงดันที่ขั้วที่ต่อแหล่งจ่าย	57
4.10 แรงดันที่โหลด	57
4.11 แรงดันชดเชยจาก UPFC	58
4.12 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว, แรงดันไฟฟ้าที่โหลด และแรงดันไฟฟ้าชดเชย	58
4.13 กำลังไฟฟ้าจริงที่ขั้ว กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดและกำลังไฟฟ้าจริงของตัวควบคุม แบบอนุกรม	59
4.14 วงจรที่ใช้ในการจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม	60
4.15 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง	60
4.16 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าเสมือน	61
4.17 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2	61
4.18 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2 เปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลในสาย	62
4.19 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน	62
4.20 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริง	63
4.21 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 แรงดันไฟฟ้า 2	63
4.22 แรงดันและกระแสที่บัส 1 และบัส 2 เปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลในสายส่ง	64
4.23 ระบบที่ใช้ในการจำลองการชดเชยแรงดันที่โหลดด้วยตัวควบคุมการไหล กำลังไฟฟ้าแบบรวม	64
4.24 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ต่อกับแหล่งจ่าย	65
4.25 แรงดันไฟฟ้าที่โหลด	65
4.26 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้า	66
4.27 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริง	66
ก.1 แบบจำลอง Phase Lock Loop	75
ก.2 แบบจำลองวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน	75
ก.3 ระบบควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน	76
ก.4 แบบจำลองวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม	76
ก.5 ระบบควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม	77
ก.6 แบบจำลองวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมระบบที่ใช้ในการควบคุม การไหล กำลังไฟฟ้า	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.7 แบบจำลองระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า	79
ก.8 วงจรการจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ	80
ก.9 แบบจำลองระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ต่อขนาน	80
ก.10 แบบจำลองระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ต่ออนุกรม	81



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้ากำลังได้แก่ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (Generation System) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Transmission System) และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution system) และส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า (Consumer) ส่วนประกอบเหล่านี้ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับการส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ไปยังโหลดซึ่งโหลดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านี้จะพิจารณาในลักษณะของกลุ่มโหลดที่ต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าย่อยปลายทาง ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ที่มีระยะทางของสายส่งประเภทนี้หลายร้อยกิโลเมตร ซึ่งจะดำเนินการส่งจ่ายด้วยระบบแรงดันสูง 115 kV, 230 kV และ 500 kV ขึ้นอยู่กับระบบที่นำมาใช้ ในส่วนของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่จ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านระบบสายป้อนที่มีระดับแรงดันตั้งแต่ 3-34 kV สายป้อนนี้ถูกต่อออกมาจากสถานีไฟฟ้าย่อย โดยสถานีไฟฟ้าย่อยจะเป็นที่รวบรวมการจ่ายโหลดให้กับผู้ใช้ไฟรายย่อย [1]

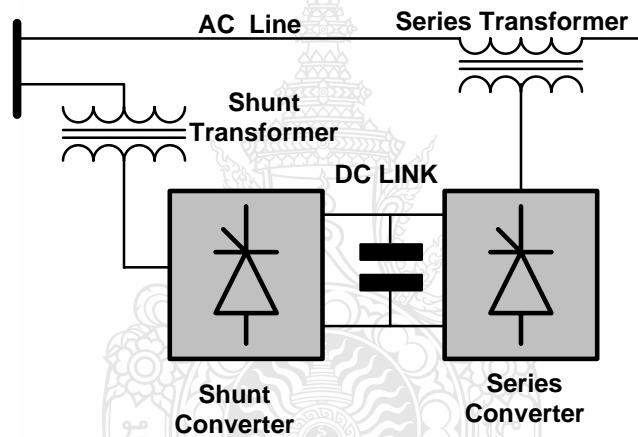
ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม และการขยายตัวภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีอัตราการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง พลังงานไฟฟ้าได้เข้าไปมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาทั้งทางเศรษฐกิจและสังคม ให้มีความรุดหน้าทั้งในแง่ของการสร้างความสะดวกสบายใช้เป็นพลังงานหลักในการขับเคลื่อนเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่ จึงมีอุปสรรคได้ว่าพลังงานไฟฟ้าได้เป็นสิ่งจำเป็นของประเทศ ส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า และจะต้องพยายามรักษาเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและมีมาตรฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ เนื่องจากปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคือแรงดันตกที่ปลายทางหรือจุดโหลด อันเนื่องมาจากแรงดันตกในสายทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้าและต่อกรไฟฟ้าเอง นอกจากนี้การเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าที่เกิดจากการลัดวงจร เกิดจากการต่อโหลดไฟฟ้าที่มากเกินไปของสายส่ง หรือเกินกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรับไหว ปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถสรุปโดยรวมได้ดังนี้

- ปัญหาทางด้านขนาดของแรงดัน เมื่อแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ห่างไกลกันกับโหลดทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียขึ้นในสายส่ง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางมีขนาดลดลง และทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อที่ปลายทางมีการชำรุดเสียหายได้

- ปัญหาทางด้านเสถียรภาพ เมื่อมีการใช้โหลดที่มีขนาดมากขึ้นส่งผลให้แรงดันในระบบลดลง ถ้าวัดจนถึงจุดพังทลายจะทำให้แรงดันในระบบขาดเสถียรภาพ ทำให้เกิดไฟฟ้าดับตามมา
- ปัญหาด้านความผิดปกติในระบบกำลังไฟฟ้า ในสภาพปกติจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระบบกำลังไฟฟ้าทุกส่วนเพื่อจ่ายไปยังโหลด เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง เช่น เกิดการลวดวงจร จะทำให้กระแสลวดวงจรที่ไหลไปยังจุดที่เกิดความผิดปกติมีค่าสูงกว่าในสภาวะปกติ ในขณะที่เดียวกันแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ จะมีค่าลดต่ำลง ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้าและต่อระบบไฟฟ้ากำลัง
- ปัญหาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการส่งพลังงานไฟฟ้าไปในระยะทางไกลๆ จะต้องส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยขนาดแรงดันสูง งบประมาณและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงมีราคาแพงมาก

นอกจากนี้ในปัจจุบันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีการขยายตัวและซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากการพัฒนาทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคมมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น ตลอดจนมีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุให้มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพและความมั่นคงกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เช่น ปัญหาด้านการเพิ่มขีดจำกัดการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง (Power Transfer Capability) และปัญหาการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนให้เป็นที่ไปตามที่ความต้องการ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของผู้ใช้ไฟ ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายอีกด้วย เช่น ปัญหาด้านขนาดของแรงดันและปัญหาทางด้านฮาร์มอนิก อย่างไรก็ตามในปัจจุบันด้วยการพัฒนาของเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ ทำให้การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงระดับหลายร้อยเมกะวัตต์ สามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์สวิตซ์จำพวกไทรสเตอร์ (Thyristors) หรือไอจีทีโอ (Gate Turn-Off Thyristors;GTO) ทำให้สามารถแก้ปัญหาการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้อุปกรณ์เหล่านี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อแก้ปัญหาทางด้านเสถียรภาพและความมั่นคงได้อีกด้วย อุปกรณ์นี้เรียกว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ (Flexible AC Transmission System devices: FACTS) ถึงกระนั้นอุปกรณ์ดังกล่าวไม่สามารถตอบสนองต่อการนำไปใช้งานที่ความถี่สวิตซ์ค่าสูงได้ อย่างไรก็ตามต่อมาข้อจำกัดด้านความถี่การสวิตซ์เหล่านี้ ถูกกำจัดไปด้วยเทคโนโลยีสวิตซ์ทรานซิสเตอร์กำลัง (Power transistor) มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) หรือไอจีบีทีกำลัง (Insulated Gate Bipolar Transistor; IGBT) แต่ถึงอย่างไรการนำเอาเทคโนโลยีเหล่านี้ ไปใช้งานกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงมีกำลังไฟฟ้าในระดับหลายร้อยหรืออาจจะเกินหลักพันเมกะวัตต์ ยังคงไม่สามารถทำได้ ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการส่งกำลังไฟฟ้าที่น้อยกว่า เช่น ระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดันปานกลาง ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันที่น้อยกว่า

เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับแรงดันโวลต์ให้มีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในทุกๆ สภาวะโวลต์ ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า และสถานการณ์จำเป็นที่ต้องการใช้ตัวชดเชย ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าภายใต้การทำงานผิดปกติในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยเน้นไปที่ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (Unified Power Flow Controller: UPFC) มีลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์นี้กับระบบประกอบด้วยตัวควบคุมขนานที่ต่อเข้ากับบัสเชื่อมต่อผ่านทางหม้อแปลงขนาน และตัวควบคุมแบบอนุกรมซึ่งต่ออนุกรมกับสายส่งผ่านทางหม้อแปลงอนุกรมโดยต่อร่วมกันด้วยตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (DC Link) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 อุปกรณ์นี้จะใช้ตัวควบคุมแบบขนานควบคุมแรงดันรอบๆ จุดเชื่อมต่อและตัวควบคุมแบบอนุกรมจะทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งนั้น อย่างไรก็ตามเมื่อตัวควบคุมแบบอนุกรมและแบบขนานถูกรวมเข้าด้วยกันอุปกรณ์ทั้งสองจะแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งกันและกันผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกัน [2]



รูปที่ 1.1 ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเป็นอุปกรณ์หนึ่งในจำพวกของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-ขนาน โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการศึกษาและจำลองการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในสภาวะชั่วคราว การศึกษานี้จะพิจารณาการควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยใช้ทฤษฎีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน (p-q Theory) และนำมาจำลองการทำงานบนโปรแกรม ATP/EMTP เพื่อให้การส่งกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เพื่อเพิ่มขีดจำกัดของการส่งกำลังไฟฟ้า ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อพัฒนาการจำลองในสถานะชั่วคราว ของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ที่ใช้งานกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสถานะเกิดแรงดันตกในช่วงสั้น

1.2.3 เพื่อรักษาระดับแรงดันที่โหลดให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม มาใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้สถานะผิดปกติ

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกำลังไฟฟ้า และสามารถชดเชยหรือรักษาแรงดันที่บัสที่ติดตั้งได้ ในระยะเวลาที่ตอบสนองอย่างรวดเร็ว

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 พัฒนาแบบจำลองของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ที่ใช้งานกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP

1.4.2 รักษาระดับแรงดันที่โหลดให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.4.3 ทดสอบผลด้วยการจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ภายใต้การทำงานในสถานะเกิดความผิดปกติ

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และวิเคราะห์อุปกรณ์ชดเชยให้กับระบบไฟฟ้า 3 เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยจำลองการควบคุมระบบขึ้นใน ATP/EMTP โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.5.1 ศึกษาหลักการควบคุมการชดเชยแรงดัน และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

1.5.2 วิเคราะห์และออกแบบ ชุดชดเชยแรงดันระบบไฟฟ้า แบบ 3 เฟส

1.5.3 ศึกษาการสร้างชุดควบคุมบนโปรแกรม ATP/EMTP

1.5.4 วิเคราะห์ ออกแบบและทดสอบการตรวจจับแรงดัน ชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าในระบบ

1.5.5 ทดสอบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เข้ากับระบบในสถานะการเกิดแรงดันผิดปกติแบบสมมาตรขึ้นในระบบ

1.5.6 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย

1.6.1 พิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ในระดับแรงดันปานกลาง

1.6.2 พิจารณาผลในสถานะชั่วคราวจากการสับวิตช์ของอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บพลังงานในตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง

1.6.3 ไม่พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.6.4 เมื่อเกิดความผิดปกติ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจะต้องอยู่ในช่วงที่ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถชดเชยได้

1.6.5 พิจารณาความผิดปกติชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

1.7 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

การนำเสนอวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีด้วยกัน 5 บท บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อระบบเกิดความไม่สมมาตร หรือความไม่สมดุลขึ้นของแรงดัน 3 เฟส เมื่อเกิดแรงดันตกในสถานะชั่วคราวเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการลัดวงจร โดยการใช้ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเพื่อทำการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนให้เกิดความสมมาตรของแรงดันขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์สำหรับการศึกษา พร้อมทั้งสมมุติฐาน ขอบเขต และขั้นตอนในการศึกษาในงานวิจัย บทที่ 2 เป็นการศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้แนวทาง ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ยืดหยุ่นได้ หลักการทำงานเบื้องต้นของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม และหลักการรักษา ระดับแรงดัน บทที่ 3 ได้อธิบายถึงโครงสร้างของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมทั้งส่วนที่ต่อขานานและอนุกรม วงจรที่ใช้ในการจำลอง โครงสร้างระบบที่ใช้ในการจำลอง ไปจำลองบนโปรแกรม ATP/EMTP เพื่อประมวลผลการจำลองบนโปรแกรม บทที่ 4 ได้นำหลักการออกแบบจำลองที่สร้างขึ้น ทดสอบกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส จากการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในส่วนที่ต่อขานานและการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม เมื่อนำมาต่อร่วมกันผ่านตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง ในการจำลองการทำงานการควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนจากอีกบัสไปยังอีกบัส โดยกำหนดให้ และกำหนดพารามิเตอร์ของทั้งสองบัสให้เท่ากัน โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี คือกรณีแรกเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง กรณีที่ 2 เป็นการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ตามขอบเขตงานที่ได้ตั้งไว้ และบทที่ 5 เป็นการสรุปผลการจัดทำวิทยานิพนธ์เชิงอภิปราย ตามจุดมุ่งหมายของการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้น อีกทั้งยังกล่าวถึงข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการทำงานวิจัยนี้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์ชดเชยสำหรับควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมการไหลทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนบนสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคือ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันต่อขนานและต่ออนุกรมเข้ากับสายส่ง โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุดเชื่อมต่อกันด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรง อินเวอร์เตอร์ที่ต่อขนานมีลักษณะเหมือนกันกับตัวชดเชยแบบคงที่ (Static Compensator) ทุกประการ โดยทั่วไปแล้วจะถูกใช้ควบคุมแรงดันที่บัสที่อินเวอร์เตอร์ต่ออยู่ ในขณะที่อินเวอร์เตอร์ที่ต่ออนุกรมจะมีลักษณะเหมือนกับตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ (Static Synchronous Series Compensator) ซึ่งถูกใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของสายส่ง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เป็นอุปกรณ์ชดเชยที่ผสมระหว่างอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานและอนุกรมเข้าด้วยกัน หลักการทำงานและการควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เป็นเรื่องที่ซับซ้อนและยุ่งยาก เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในบทนี้จึงได้นำเสนอหลักการการทำงานเบื้องต้น และหลักการควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ดังรายละเอียดในแต่ละหัวข้อต่อไปนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L. Gyugyi [3] นำเสนอตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเป็นอุปกรณ์สำหรับสำหรับควบคุมแบบ Real-Time และการชดเชยแบบพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันการทำงานหลายฟังก์ชัน สามารถแก้ปัญหาของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ โดยสามารถควบคุมพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับการไหลของกำลังไฟฟ้าทุกค่าพร้อมกันได้ หรือสามารถเลือกควบคุมค่าใดค่าหนึ่งได้ ตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวมที่ใช้ประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์อนุกรมที่ใช้อุปกรณ์คาปาซิเตอร์อนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-Controlled Series Capacitor; TCSC) ต่อร่วมกับ คอนเวอร์เตอร์ขนานที่ใช้อุปกรณ์ตัวควบคุมมุมเฟสด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator; TCPAR)

Sanbao Zheng and Yoke Lin Tan [4] นำเสนอการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม บนโปรแกรม MATLAB ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม มีสมรรถนะการทำงานที่ดีและตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว แต่คอนเวอร์เตอร์ขนานและคอนเวอร์เตอร์อนุกรมเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของทรินสเตอร์ที่สามารถหยุดนำกระแสได้ด้วยตัวเองไม่สามารถตอบสนองต่อเทคนิคการสวิตซ์ซึ่งที่ความถี่สูงได้

N.Tambey [5] นำเสนอการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเพื่อหน่วงการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หรือมีการเกิดการผิดปกติในระบบ โดยการควบคุมมุมเฟสแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ขนานและคอนเวอร์เตอร์อนุกรมแต่ยังไม่ได้นำเสนอถึงพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

Samina Elyas Mubeen, R. K. Nema, and Gayatri Agnihotri [6] ได้นำเสนอการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว (Steady-State) โดยใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้ากับระบบ 5 บัส วิเคราะห์การทำงานของระบบด้วยสมการของนิวตัน-ราฟสัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสามารถช่วยให้การไหลการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่ได้นำเสนอถึงการจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

จากการวิจัยที่ได้ศึกษาเห็นความสำคัญของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ที่แก้ปัญหาในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการควบคุมได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า จึงได้จำลองการทำงานเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในสภาวะชั่วคราว (Transient) โดยคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถตอบสนองต่อการสวิตซ์ซึ่งที่ความถี่สูง และรองรับเทคนิคการควบคุมขั้นสูงได้

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบส่งกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้

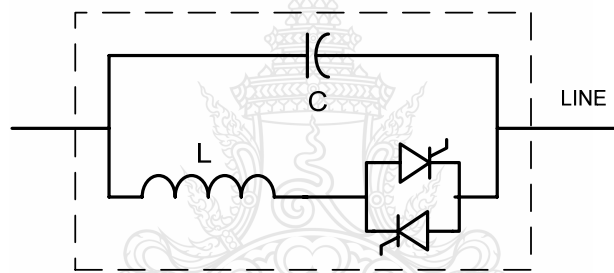
ความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี ความต้องการระบบไฟฟ้าที่มีความมั่นคงจึงเพิ่มมากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการขยายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มเสถียรภาพและความมั่นคงในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากยิ่งขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการขยายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นถูกจำกัดด้วยเหตุผลทางสังคมและสิ่งแวดล้อม รวมถึงข้อจำกัดในเรื่องงบประมาณในการลงทุน ส่งผลให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ต้องหันมาใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ด้วยเหตุนี้สายส่งกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้ความสนใจ เนื่องจากโดยปกติแล้วกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งนั้นถูกจำกัดไว้ที่ขอบเขตของเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ซึ่งขอบเขตนี้ น้อยกว่าขอบเขตของอุณหภูมิของสายส่ง อย่างไรก็ตามในอดีตการใช้สายส่งทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดจนถึงขอบเขตของอุณหภูมินั้นเป็นไปไม่ได้เนื่องจากอาจส่งผลให้ขาดเสถียรภาพ ขาดความมั่นคง รวมไปถึงขาดความปลอดภัย ตัวอย่างเช่น กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเป็นฟังก์ชันของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ขนาดและมุมเฟสของแรงดันต้นสายและปลายสาย ดังนั้นในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจะสามารถทำได้โดยการควบคุมตัวแปรเหล่านี้เท่านั้น ซึ่งในอดีตตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมให้เร็วพอที่จะรักษาเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าได้ จนกระทั่งประมาณปลายทศวรรษที่ 80 สถาบันวิจัยไฟฟ้ากำลัง EPRI (Electric Power Research Institute) ที่เน้นงานวิจัยเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อใช้กับระบบส่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง (High Voltage Direct Current: HVDC) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับการชดเชยสายส่งกระแสสลับ (AC line Compensation) ได้นำเสนอหลักการทั่วไปสำหรับชดเชยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เรียกว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ โดยมีวัตถุประสงค์หลักสองประการ ได้แก่การเพิ่มขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง และการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง (Power Flow Control Through Power Transmission Line) ซึ่งได้ตีพิมพ์โดย N.G. Hingorani และ L. Gyugyi ในปี 1991 หลังจากนั้นหลักการของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากหลักการนี้เป็นทางออกสำหรับการเพิ่มขีดความสามารถของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

นิยามของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ตามมาตรฐานของ Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE หมายถึงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมแบบคงที่ (Static Controller Devices) อย่างอื่น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและส่งเสริมการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง [1] ความสามารถหลักของอุปกรณ์คือ การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน การควบคุมแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถควบคุมได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชดเชยอย่างเดิม เช่น คาปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor Bank) รีแอกเตอร์ชาน (Shunt Reactor) และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้สามารถทำงานได้หลายฟังก์ชันในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Oscillations Damping) และสามารถทำงานร่วมกับการควบคุมระดับสูงของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้เป็นที่ยอมรับในการพัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่งเสริมเสถียรภาพทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต (Static and Dynamic) และนอกจากนี้ยังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ถูกติดตั้งเข้าไปในระบบเพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี โดยทั่วไปแล้วระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้สามารถจำแนกออกตามโครงสร้างได้ดังนี้

2.2.1 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม

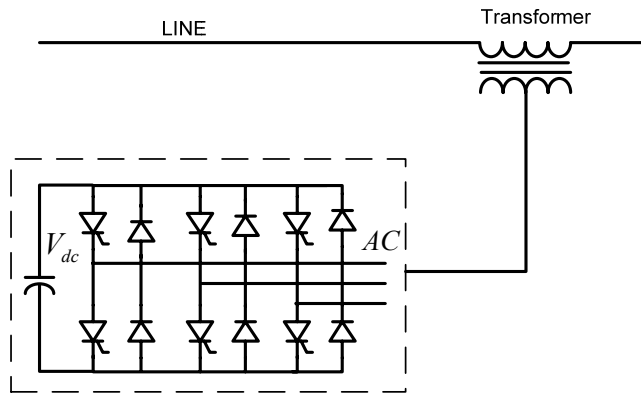
ตัวควบคุมแบบอนุกรมจะต่ออนุกรมกับสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.1 อุปกรณ์ชนิดนี้อาจเรียกได้ว่าเป็นอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งคาปาซิทีฟรีแอกเตอร์หรือบางครั้งอาจเรียกว่าแหล่งจ่ายอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ การทำงานหลักของอุปกรณ์ที่ต่อในลักษณะนี้จะเป็นการฉีดแรงดันที่อนุกรมกับสายส่ง การทำงานของอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมจึงเหมือนกับเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งได้ จุดประสงค์หลักของอุปกรณ์นี้คือการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งโดยการเปลี่ยนแปลงรีแอกแตนซ์ของสายส่งนั่นเอง ตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ในประเภทตัวควบคุมแบบอนุกรมคือ ตัวชดเชยอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Compensator; TCSC) วงจรพื้นฐาน TCSC ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์อนุกรม และรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตัวชดเชยอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะต่ออนุกรมกับสายส่ง เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม

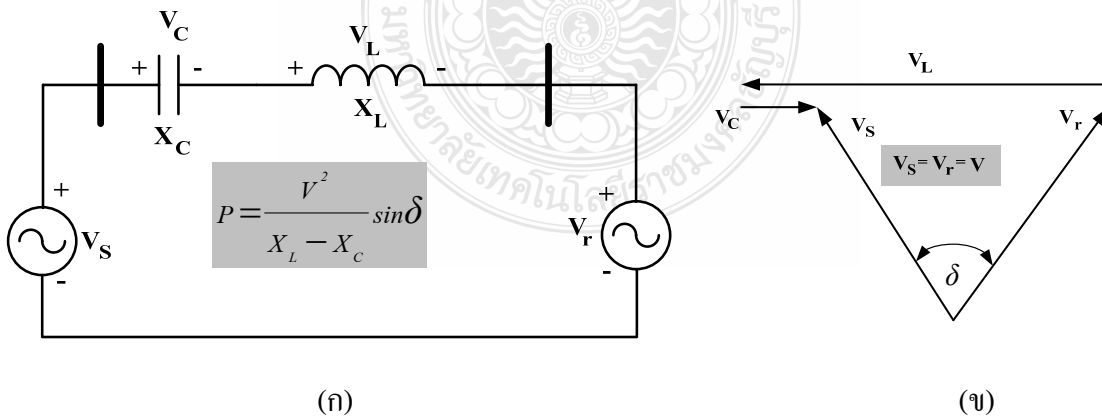
2.2.2. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่

ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สำคัญในจำพวกของตัวควบคุมแบบอนุกรม โดยส่วนใหญ่แล้วการทำงานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ อาศัยหลักการของตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Sourced Converter: VSC) ซึ่งจะต่ออนุกรมกับสายส่งผ่านหม้อแปลงอนุกรม ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 แรงดันที่ถูกผลิตขึ้นโดยตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ นี้จะถูกฉีดเข้าไปในสายส่งโดยผ่านหม้อแปลงอนุกรมเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมในสายส่ง และนอกจากนี้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้อีกด้วย



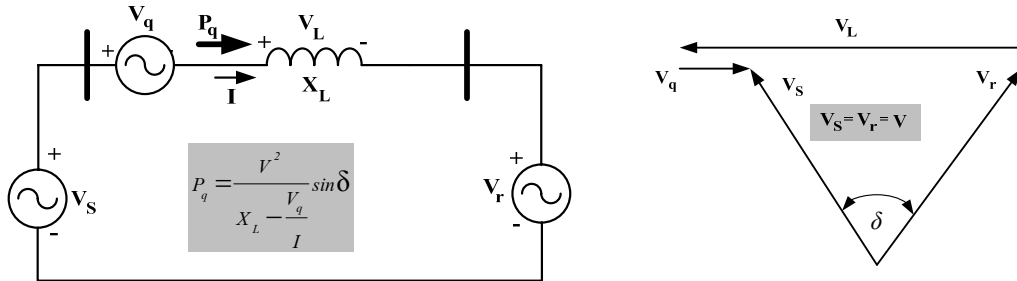
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของตัวชดเชยอนุกรมแบบคองที่

ตัวชดเชยอนุกรมแบบคองที่ เป็นอุปกรณ์ชดเชยอีกชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มของเทคโนโลยีวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Gyugyi ในปี 1989 หลักการทำงานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคองที่ สามารถอธิบายโดยโดยการเริ่มต้นพิจารณาจากการชดเชยด้วยคาปาซิทีฟแบบอนุกรมดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก) สัมพันธ์กับเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่กระแสของสายส่งที่กำหนด แรงดันที่ตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์อนุกรมจะส่งผลให้ แรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์สายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่า การชดเชยคาปาซิทีฟแบบอนุกรมทำงาน โดยการเพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแรงดันนี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสในสายส่งและกำลังไฟฟ้าที่สายส่ง



รูปที่ 2.3 ระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน

ลักษณะการชดเชยแบบนี้สามารถทำได้เช่นเดียวกันโดยใช้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัส (Synchronous AC Voltage) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแรงดันเอาต์พุตนี้มีลักษณะที่เหมือนกันกับแรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์อนุกรมดังสมการ (2.1)



รูปที่ 2.4 ระบบที่ติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ และเฟสเซอร์โวลเตจของแรงดัน

$$V_q = V_C = -jX_C I = -jkXI \quad (2.1)$$

- โดยที่ V_C คือ แรงดันที่ชดเชยด้วยคาปาซิเตอร์
 I คือ กระแสไฟฟ้าในสายส่ง
 X_C คือ รีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์อนุกรม
 $k = \frac{X_C}{X}$ คือ Degree ของการชดเชยแบบอนุกรม

ดังนั้นการทำให้แรงดันซิงโครนัสเอาต์พุต (V_q) เป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าในสายส่งจะทำให้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ทำหน้าที่เหมือนกับคาปาซิเตอร์อนุกรมได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามในทางตรงกันข้ามกับคาปาซิเตอร์อนุกรม ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถรักษาแรงดันชดเชยให้คงที่ได้ ขณะที่กระแสในสายส่งเกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้ว่า ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถควบคุมขนาดของแรงดันชดเชยที่แทรกเข้าไปในสายส่งได้โดยไม่ขึ้นกับกระแสในสายส่ง โดยทั่วไปแล้ว การชดเชยคาปาซิทีฟ แรงดันเอาต์พุตจะล่าหลังกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศา สำหรับตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมให้นำหน้าหรือล่าหลังกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศาได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถลดหรือเพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่งได้

ในทำนองเดียวกันกับ TCSC ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ที่สามารถป้องกันการเกิดความไม่เสถียรภาพของแรงดันได้ นอกจากนี้การติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถเพิ่มขีดความสามารถควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย การประยุกต์ใช้งานอีกอย่างหนึ่งของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ คือการนำไปติดตั้งกับระบบไฟฟ้าเพื่อส่งเสริมเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ และยิ่งไปกว่านั้นการติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่และ TCSC มีการประยุกต์ใช้งานเหมือนกันแต่ใน การทำงานและรูปแบบการชดเชยของทั้งสองจะแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้สัมพันธ์กับ ความแตกต่างของวงจรกำลังของอุปกรณ์ทั้งสอง คุณสมบัติของวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ของตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ มีความสามารถและรูปแบบการทำงานบางอย่างที่ TCSC ไม่สามารถ ทำได้ ความแตกต่างของอุปกรณ์ทั้งสองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถกำเนิดแรงดันชดเชยที่ควบคุมภายในทั้งย่านคาปาซิทีฟ และอินดักทีฟโดยไม่ขึ้นกับขนาดกระแสในสายส่ง ในขณะที่การรักษาแรงดันชดเชยของ TCSC จะขึ้นอยู่กับกระแสในสายส่ง

2. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงภายนอกสามารถ ชดเชยในส่วนที่เป็นความต้านทานของสายส่ง โดยการฉีดกำลังไฟฟ้าจริง และสามารถชดเชย ในส่วนที่เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่งด้วยการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในขณะที่ TCSC ชดเชยในส่วนที่ เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่งเท่านั้น แต่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริง (ยกเว้นการสูญเสียในวงจร) กับสายส่งได้

3. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่เชื่อมต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (หรือแหล่งจ่ายสำรอง) จะเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยการชดเชยทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟผสมกัน ในขณะที่ TCSC สามารถหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดยการชดเชย เฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่านั้น

4. อุปกรณ์ TCSC จะเชื่อมต่อโดยตรงกับสายส่งซึ่งต้องการติดตั้งบนลานสำหรับแรงดันสูง นอกจากนี้ระบบการทำความเย็นและการควบคุมต้องมีขนาดที่ทนแรงดันสูงได้ ในขณะที่ ตัวชดเชย อนุกรมแบบคงที่ จะเชื่อมต่อกับสายส่งผ่านทางหม้อแปลงอนุกรม และต้องการคาปาซิเตอร์สำหรับเก็บ พลังงานไฟฟ้ากระแสตรง การติดตั้งตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถทำงานติดตั้งภายในอาคารและ ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (โดยทั่วไปประมาณ 20 kV) นอกจากนี้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ต้องการระบบ ทำความเย็นและระบบควบคุมที่ใช้ขนาดที่ทนแรงดันต่ำกว่า TCSC

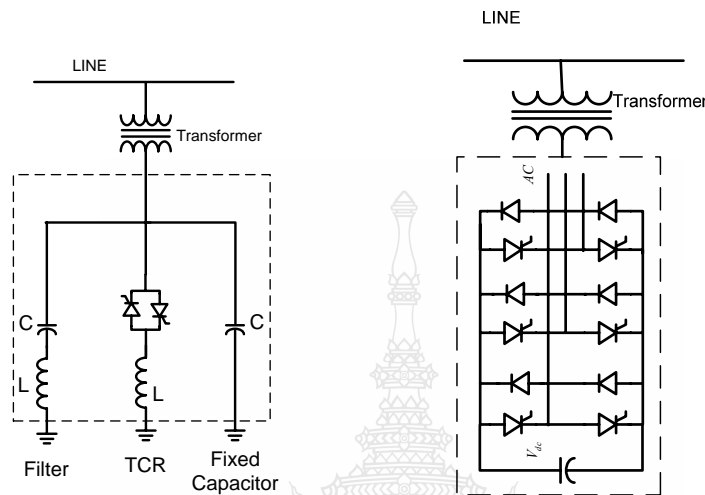
จนถึงปัจจุบันการติดตั้งใช้งานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังไม่ปรากฏให้เห็น อย่างไรก็ตาม มีการวิจัยและการศึกษาเกี่ยวกับ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ หลายบทความด้วยกัน เช่น (Han, Moon, Park, and Karady, 2000) ได้นำเสนอการศึกษาลักษณะเชิงพลวัตของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบ คงที่ ที่มีแบบแผนของวงจรแปลงผัน 6 บริดจ์ซึ่งใช้ใช้การควบคุมแบบ PWM การศึกษานี้ทำการจำลอง บนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม EMTP ระบบไฟฟ้าที่นำมาจำลองเป็นระบบเครื่องจักร 1 ตัว เชื่อมต่อ กับบัสอนันต์ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ถูกแทรกอนุกรมเข้าสายส่งโดยไม่ผ่านหม้อแปลง ซึ่งกำเนิดแรงดันเอาต์พุตที่มีเฟสต่างจากกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศา ทำการทดสอบการทำงานใน โหมดของคาปาซิทีฟและอินดักทีฟ ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตของการทำงาน ทั้งในโหมดคาปาซิทีฟและอินดักทีฟได้เป็นอย่างดี ต่อมา (Zhang, 2003) ได้นำเสนอแบบจำลอง

ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่มีการควบคุมหลายฟังก์ชันสำหรับการควบคุมตัวแปรของการไหลกำลังไฟฟ้าที่ใช้การคำนวณแบบ Newton ซึ่งพิจารณา ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สำหรับควบคุมตัวแปรการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัว ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง แรงดันที่บัส และอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยพิจารณาการควบคุมตัวแปรที่ละตัว ซึ่งแบบจำลองนี้ได้คำนึงถึงเงื่อนไขบังคับกระแสและแรงดันของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ด้วยการตรวจสอบได้ทำการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ Newton ที่ประกอบด้วยแบบจำลองของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ กับระบบ IEEE 30 บัส และ 118 บัส และ 300 บัส ผลจากการทดสอบพบว่า การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงด้วยวิธี Newton ที่ประกอบด้วยแบบจำลอง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถลู่เข้าโดยใช้การคำนวณหลายรอบและมีความคลาดเคลื่อนยินยอมเท่ากับ 10^{-12} p.u. นอกจากนี้ (Haque, 2005) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างตัวชดเชยแบบคงที่ และ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ในการปรับปรุงขีดจำกัดของเสถียรภาพ ภายใต้การพิจารณาการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบทดสอบเป็นระบบแบบเครื่องจักร 1 ตัวเชื่อมกับบัสอนันต์ ที่ประกอบด้วยตัวชดเชยแบบคงที่ และตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยแบบคงที่ มีประสิทธิภาพดีกว่า ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ในการปรับปรุงเสถียรภาพการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในคาบต่อมา และนอกจากนี้ (Jowder, 2007) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่กับ Wind Farms แบบความเร็วคงที่ซึ่ง Wind Frames นี้ตั้งอยู่ห่างจากระบบไฟฟ้าและส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งที่มีความยาวมาก ส่งผลให้ความสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ลดลง ในขณะที่ต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากขึ้นการประยุกต์ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่กับ Wind Farms จะเชื่อมต่ออนุกรมเข้ากับกลางสายส่งเพื่อใช้รักษาแรงดันที่ขั้วที่ทำการเชื่อมต่อ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ทางด้าน Wind Farms การทดสอบทำการจำลองบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Hypersim ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่สามารถรักษาระดับแรงดันที่ขั้วได้ นอกจากนี้ยังสามารถชดเชยอินดักทีฟได้อีก

2.2.3 ตัวควบคุมแบบขนาน

ตัวควบคุมแบบขนานจะต่อขนานกับระบบที่บัสเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.5 อุปกรณ์ชนิดนี้อาจมองว่าเป็น อิมพีแดนซ์หรือแหล่งจ่ายที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ หรือบางครั้งอาจเป็นทั้งสองอย่างพร้อมกัน หลักการทั่วไปของอุปกรณ์จำพวกตัวควบคุมแบบขนานทั้งหมดจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรักษาระดับแรงดันรอบ ๆ จุดที่เชื่อมต่อโดยอาศัยหลักการฉีดหรือดึงกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟเพียงอย่างเดียว แต่ในบางกรณีอาจต้องการทั้งกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟและกระแสจริงเพื่อผลของการควบคุมแรงดันที่ดีขึ้นและเพื่อลดการแกว่งของแรงดัน(Damping of Voltage Oscillations) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคงที่ (Static Var Compensator: SVC) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์จำพวกของตัวควบคุมแบบขนาน โดยทั่วไป SVC ประกอบด้วยตัวรีแอกเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Control Reactor: TCR)

ต่อขนานกับคาปาซิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่ (Fixed Capacitor: FC) หรืออาจต่อขนานกับคาปาซิเตอร์สวิตช์ด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Switch Capacitor: TSC) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) นอกจากนี้อุปกรณ์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของอุปกรณ์ในจำพวกของตัวควบคุมแบบขนาน คือตัวชดเชยแบบคงที่ (Static Compensator) หรือที่นิยมเรียกกันว่า STATCOM ซึ่งการทำงานอาศัยหลักการของตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดันเช่นเดียวกันกับ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แต่จะแตกต่างกันตรงที่จะเชื่อมต่อแบบขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข)



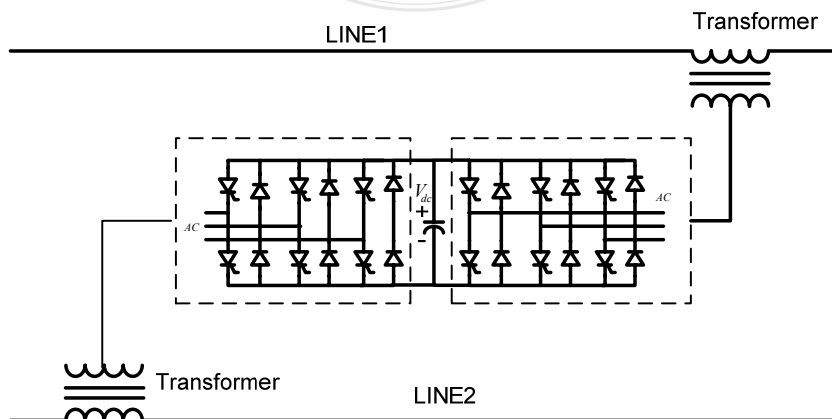
(ก) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคงที่

(ข) ตัวชดเชยแบบคงที่

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบขนาน

2.2.4 ตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-อนุกรม

ตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-อนุกรม เป็นอุปกรณ์ที่รวมอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมที่แยกกันอยู่เข้าด้วยกัน โดยการควบคุมอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมที่ติดตั้งบนสายส่งแต่ละเส้นร่วมกัน บางครั้งเรียกอุปกรณ์นี้ว่าตัวควบคุมแบบรวม (Unified Controller) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

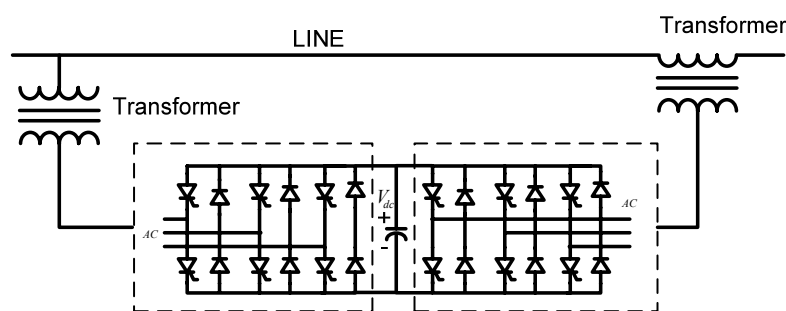


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม – อนุกรม

จากรูปที่ 2.6 ตัวควบคุมแบบอนุกรมแต่ละตัวจะชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับสายส่งแต่ละเส้นแยกอิสระจากกัน แต่จะส่งกำลังไฟฟ้าจริงถึงกันโดยผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Link) ที่เชื่อมต่อถึงกัน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าระหว่างสาย (Interline Power Flow Controller: IPFC) เป็นอุปกรณ์ที่นำเสนอแนวคิดใหม่ของอุปกรณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ที่อยู่ในจำพวกของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-อนุกรม เพื่อใช้ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งหลายเส้น IPFC ประกอบด้วย ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สองตัวที่ต่ออนุกรมกับสายส่งแต่ละเส้น แต่จะเชื่อมต่อกันโดยผ่านระบบเชื่อมต่อกระแสตรงเพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งกันและกัน โครงสร้างของ IPFC แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 จากรูป ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แต่ละตัวจะต่อกับสายส่งที่แตกต่างกันโดยผ่านหม้อแปลงอนุกรม ซึ่งแต่ละตัวจะทำการควบคุมการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแยกอิสระจากกัน

2.2.5 ตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-ขนาน

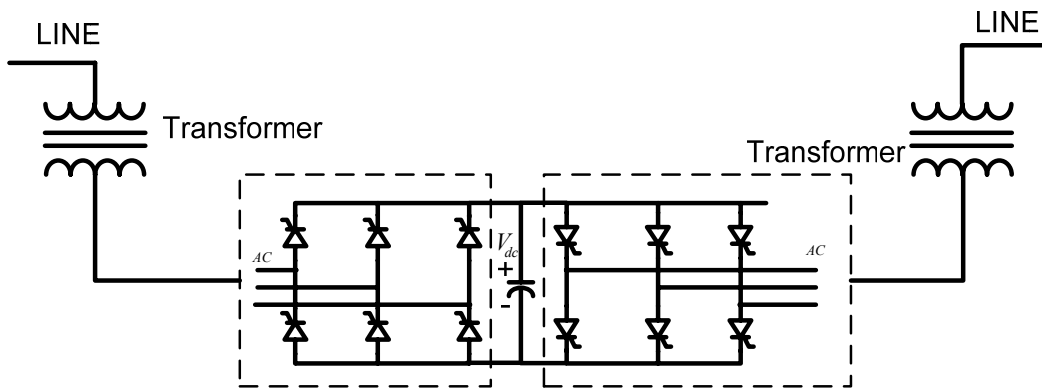
ตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-ขนาน เป็นอุปกรณ์ที่รวมอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมและตัวควบคุมแบบขนานเข้าด้วยกันโดยการควบคุมอุปกรณ์ทั้งสองร่วมกัน หรือที่เรียกว่าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (Unified Power Flow Controller: UPFC) ซึ่งมีลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์นี้กับระบบดังแสดงในรูปที่ 2.7 อุปกรณ์นี้จะใช้ตัวควบคุมแบบขนานควบคุมแรงดันรอบ ๆ จุดเชื่อมต่อและตัวควบคุมแบบอนุกรมจะทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งนั้น อย่างไรก็ตามเมื่อตัวควบคุมแบบอนุกรมและแบบขนานถูกรวมเข้าด้วยกันอุปกรณ์ทั้งสองจะแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งกันและกันผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกัน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเป็นอุปกรณ์หนึ่งในจำพวกของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-ขนาน ซึ่งเป็นการรวมเอาข้อดีของตัวชดเชยแบบคงที่ และตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่มาทำงานร่วมกัน โดยในส่วนของ ตัวชดเชยแบบคงที่ จะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันรอบ ๆ บัสเชื่อมต่อและในขณะที่ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง อุปกรณ์ทั้งสองตัวนี้จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันผ่านระบบเชื่อมโยงกระแสตรงเพื่อแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งกันและกัน โครงสร้างของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.7



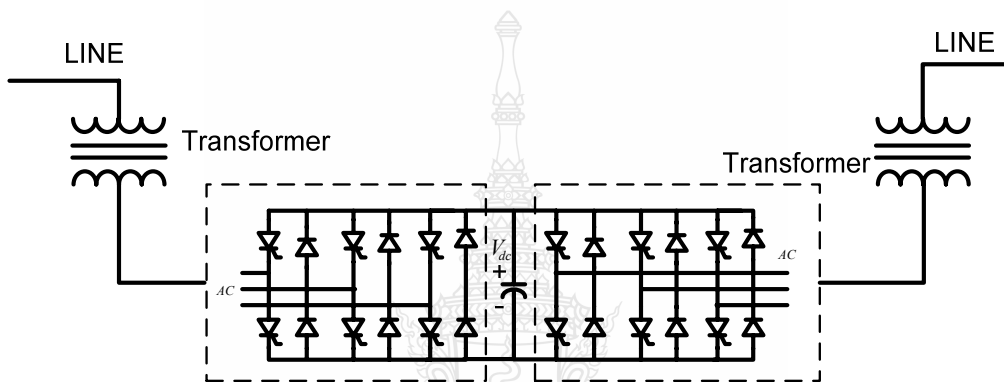
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม – ขนาน

2.2.6 ตัวควบคุมแบบผสมขนาน – ขนาน

ตัวควบคุมแบบผสมขนาน-ขนาน ประกอบด้วยตัวควบคุมที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าสองตัว และเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์นี้กับระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะส่งผ่านเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น ในส่วนของกำลังไฟฟ้าเสมือนจะแลกเปลี่ยนกันระหว่างตัวคอนเวอร์เตอร์กับระบบไฟฟ้า ดังนั้น ตัวควบคุมแบบขนานจะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าจริงไปยังตัวควบคุมอีกด้านหนึ่งได้โดยการส่งผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (High Voltage Direct Current Transmission System: HVDC) ถูกจัดให้เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ที่มีตัวแปลงผันทั้งสองตัวต่อขนานกับระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) จากรูปตัวแปลงผันทั้งสองของ HVDC จะใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำงาน ตัวแปลงผันทั้งสองจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งอาจจะยาวเพียงไม่กี่เมตรหรืออาจเป็นหลายร้อยกิโลเมตรก็ได้ ตัวแปลงผันที่สถานีส่งจะทำหน้าที่เป็นสถานีเรียงกระแส (Rectifier) ในขณะที่สถานีรับจะทำหน้าที่เป็นสถานีอินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยทั่วไปแล้วระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานีเรียงกระแส ในส่วนของสถานีอินเวอร์เตอร์จะกำหนดให้ทำงานที่มุมจุกชนวนสูงสุดและที่แรงดันกำหนด ปัจจุบันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวแปลงผันแบบไทรสเตอร์ยังคงมีใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบที่มีกำลังไฟฟ้าสูงในย่านหลายร้อย MW ข้อดีของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงคือ มีประสิทธิภาพและมีความมั่นคงสูง แต่อย่างไรก็ตามระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงยังมีข้อเสียคือมีกระแสฮาร์มอนิก ทั้งทางด้านกระแสสลับและกระแสตรง นอกจากนี้การนำระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแส สลับที่อ่อนแอ อาจได้รับผลกระทบจากการเกิดความผิดปกติของการสับเปลี่ยนการนำกระแสในอุปกรณ์ไทรสเตอร์ (Thyristor Commutation Failures) ความผิดปกตินี้เกิดขึ้นที่สถานีอินเวอร์เตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีความผิดเพี้ยนหรือเมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าตก ซึ่งความผิดปกตินี้อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้ อย่างไรก็ตามปัญหานี้แก้ไขได้โดยการนำอุปกรณ์สวิตช์กำลังหยุดนำกระแสด้วยตัวเอง (Self-Commutated Switching Power Devices) มาใช้งานแทนอุปกรณ์ไทรสเตอร์ ดังนั้นปัจจุบันจึงได้มีการนำอุปกรณ์จำพวก GTO และ IGBT มาใช้งานเป็นตัวแปลงผันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเรียกว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเบา (HVDC-Light) โดยส่วนใหญ่ตัวแปลงผันเหล่านี้จะเป็นตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) ข้อดีของตัวแปลงผันแบบนี้คือ มีฮาร์มอนิกดีกว่าแบบเดิม และยังสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังสามารถรักษาการทำงานในสภาวะเกิดความผิดปกติทางด้านกระแสสลับได้อีกด้วย



(ก) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HVDC)



(ข) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบเบนา

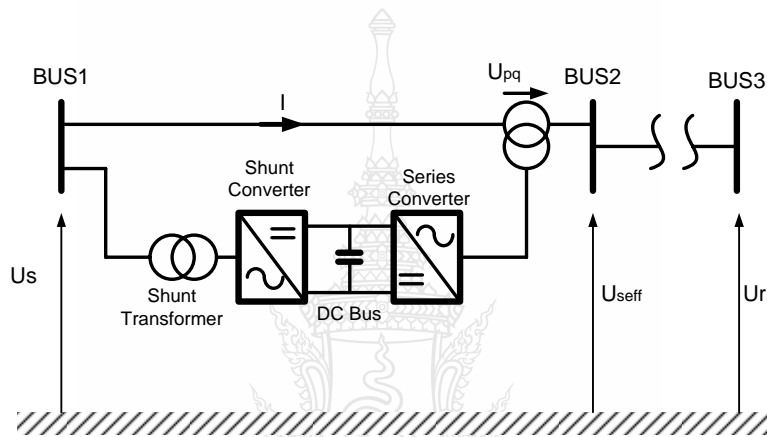
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมขนาน - ขนาน

โดยทั่วไปตัวควบคุมแบบขนานจะถูกออกแบบเพื่อควบคุมแรงดันที่บัสที่เชื่อมต่อ ซึ่งจะผลิตกระแสไฟฟ้รีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่ตัวควบคุมแบบอนุกรมจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมการไหลของกระแส หรือการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เนื่องจากสามารถฉีดแรงดันเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์สายส่งได้ จึงเป็นเหตุให้ตัวควบคุมแบบอนุกรมสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามในกรณีที่แรงดันตกคร่อมที่สายส่งมีมากทำให้เกิดแรงดันตกที่บัส ตัวควบคุมแบบอนุกรมสามารถรักษาระดับแรงดันที่บัสได้เช่นกัน

2.3 หลักการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

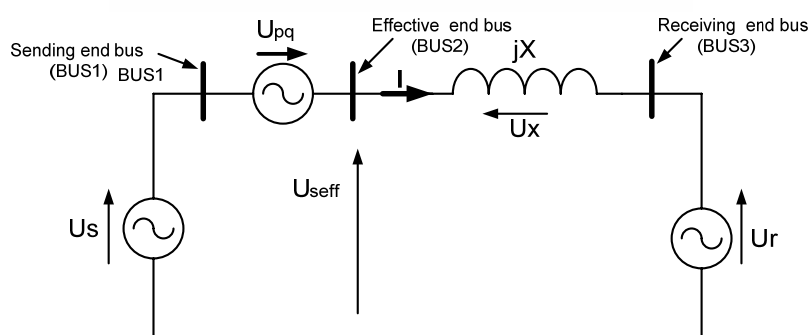
รูปแบบวงจรของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.9 คอนเวอร์เตอร์ขนาน (Shunt Converter) ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่บัส 1 ผ่านทางหม้อแปลงขนาน (Shunt Transformer) ทำหน้าที่จ่ายและรับกำลังไฟฟ้าเสมือน และทำการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงกับคอนเวอร์เตอร์อนุกรมผ่านตัวเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนคอนเวอร์เตอร์อนุกรมถูกต่ออนุกรม

เข้ากับสายส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ผ่านทางหม้อแปลงอนุกรม ซึ่งหม้อแปลงอนุกรมนี้จะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสลับที่ควบคุมทั้งขนาดและมุมเฟสเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่ง สำหรับชุดคอนเวอร์เตอร์จำนวนสามสามารถใช้คอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบสองระดับ หรือสามระดับ ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ใช้คอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบสามระดับ เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์อนุกรมจะต้องปรับทั้งขนาดและมุมเฟส ในส่วนของตัวเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน รายละเอียดของชุดคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปจะเห็นว่าชุดคอนเวอร์เตอร์ของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม จะประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์สองชุดที่ใช้ Gate Turn- Off (GTO) เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ ชุดคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองจะทำงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าร่วมกัน

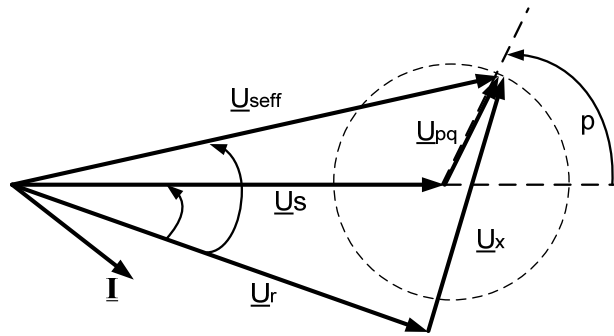


รูปที่ 2.9 แบบส่วนประกอบของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

หลักการของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถอธิบายจากวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นวงจรพื้นฐานของระบบ 2 บัสแล้วมีแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถควบคุมได้ต่อเข้าไประหว่างบัสต้นทางกับบัสปลายทาง โดยแหล่งจ่ายแรงดันนี้สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดันแทนด้วย U_{pq} ดังแสดงในเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 วงจรพื้นฐานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรพื้นฐานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม
ในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 2.11 ถ้าแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้นี้ไม่จ่ายแหล่งแรงดัน ($U_{pq} = 0$) จะได้สมการของ
กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทาง ดังนี้

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

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

เมื่อ

P_o คือ กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้า

Q_{ro} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทาง

U_s คือ แรงดันไฟฟ้าของบัสต้นทาง

U_r คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสปลายทาง

X คือ ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง

δ คือ มุมเฟสระหว่างบัสต้นทางและบัสปลายทาง

เมื่อสมมติให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสต้นทางและแรงดันไฟฟ้าที่บัสปลายทางคงที่และเท่ากัน ดังนั้น
จากสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) จะได้สมการดังนี้

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

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

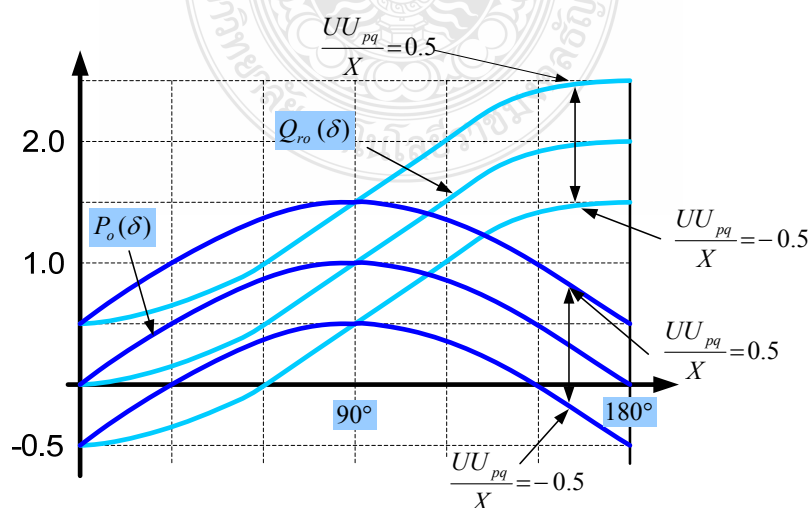
จากรูปที่ 2.11 ถ้าแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้นี้จ่ายแหล่งแรงดัน (U_{pq}) สมการของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) เขียนเป็นสมการใหม่ดังนี้

$$P(\delta, \rho) = \frac{U^2}{X} \sin \delta - \frac{UU_{pq}}{X} \cos\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) = P_0(\delta) + P_{pq}(\delta, \rho) \quad (2.5)$$

$$Q_r(\delta, \rho) = \frac{U^2}{X} (1 - \cos \delta) - \frac{UU_{pq}}{X} \sin\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) = Q_{r0}(\delta) + Q_{pq}(\delta, \rho) \quad (2.6)$$

- เมื่อ
- P คือ กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้า
 - Q_r คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทาง
 - P_0 คือ กำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า
 - Q_{r0} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทางที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า
 - U_{pq} คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้
 - ρ คือ มุมเฟสของแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้
 - P_{pq} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้
 - P_{pq} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้

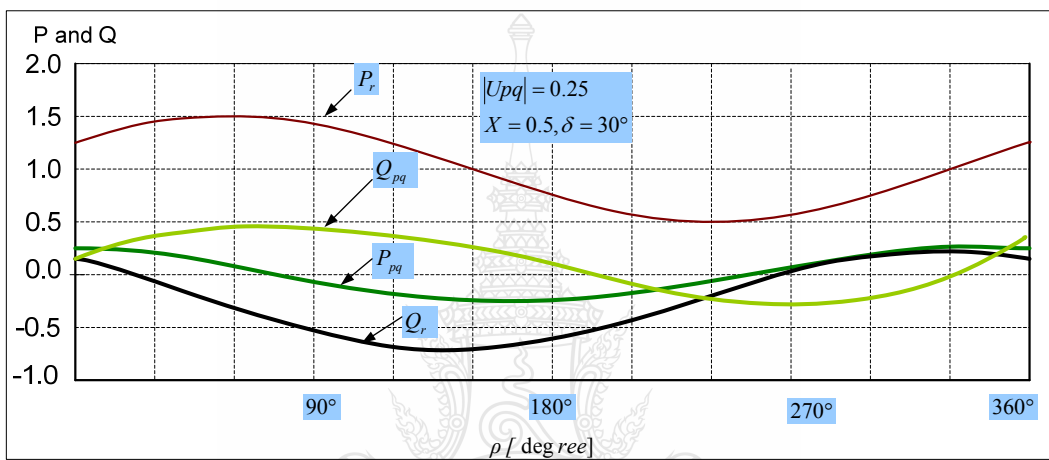
กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสมการที่ (2.5) และ (2.6) ในฟังก์ชันของมุมต่างเฟส (δ), แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้ และมุม ρ สามารถเขียนแสดงเป็นรูปภาพลักษณะคุณสมบัติได้ในรูปที่ 2.12 ($U_{pq} = 0.5$)



รูปที่ 2.12 ลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน

จากลักษณะคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในรูปที่ 2.12 สามารถควบคุมมุม δ ด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ U_{pq} กำลังไฟฟ้าจริงสามารถเพิ่มขึ้นเมื่อควบคุมแรงดันที่ U_{pq} ให้เป็นบวกและกำลังไฟฟ้าจริงจะลดลงได้เมื่อควบคุมแรงดัน U_{pq} ให้เป็นลบ กำลังไฟฟ้าจริงจะเป็นลบเมื่อมุม δ มีค่าต่ำกว่า 30 องศา ($\delta \leq 30^\circ$) ในทำนองเดียวกันกำลังไฟฟ้าเสมือนจะเป็นลบเมื่อมุม δ มีค่าต่ำกว่า 60 องศา ($\delta \leq 60^\circ$)

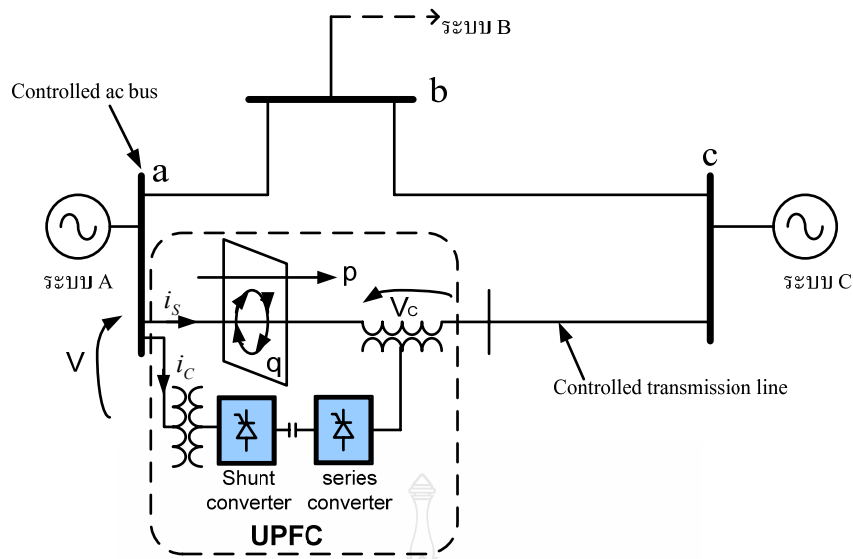
การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสปลายทางและแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้ U_{pq} ในฟังก์ชันของมุมของแรงดันไฟฟ้า ρ สามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.13 เมื่อสมมุติให้แรงดันมีขนาด 0.25 และค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งเป็น 0.5 และมุมต่างเฟสที่ค่า 30 องศา



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกแตนซ์ในฟังก์ชันของการควบคุมมุมของแรงดันไฟฟ้า ρ

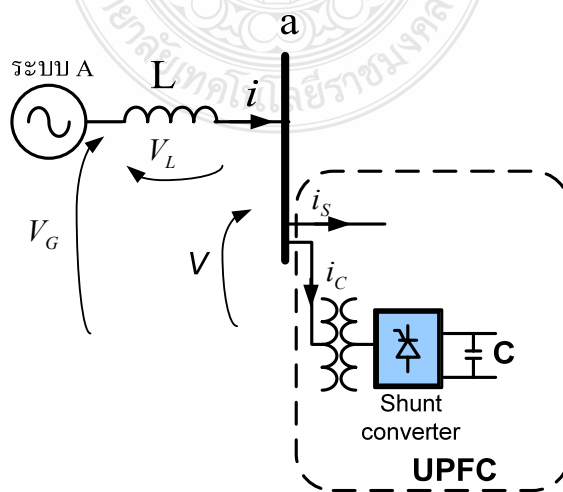
2.4 การรักษาระดับแรงดัน

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 เป็นกระแสของสายส่งที่สามารถควบคุมได้ที่อยู่ระหว่างบัส a กับ บัส c ดังรูปที่ 2.14 จะควบคุมด้วยคอนเวอร์เตอร์อนุกรมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ($p-q$) ที่ต้องการ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเสมือนที่สามารถควบคุมได้ i_c จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เฉพาะกระแสที่ไหลผ่านระบบ A เปลี่ยน โดยระบบ A จะสมมุติให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันต่ออยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูล (L) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



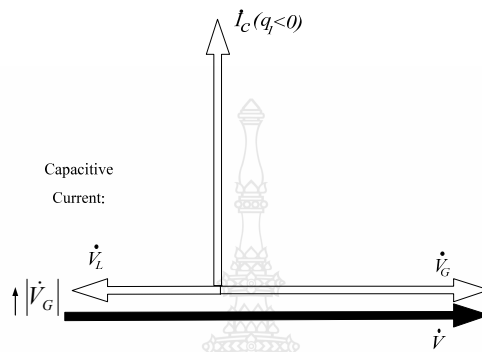
รูปที่ 2.14 การรักษาระดับแรงดันที่บัสควบคุม

รูปที่ 2.15 แสดงถึงส่วนหนึ่งของวงจรในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกระแส i_c จากกระแสที่ไหลผ่านค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของระบบ A รูปที่ 2.16 แสดงเฟสเซอร์ไคอะแกรมของวงจรในรูปที่ 2.14 แสดงถึงการรักษาระดับแรงดันโดยการฉีดกระแส I_c ที่มีมุมต่างเฟสกับกับแรงดัน \dot{V} ของแรงดันที่สามารถควบคุม (v) เป็นมุม 90° ถ้ากระแสชดเชย I_c ผลิตเฉพาะกำลังไฟรีแอกทีฟด้วยแรงดัน \dot{V} เฟสเซอร์ \dot{V} และ \dot{V}_G ของแรงดัน v และ v_G จะมีเฟสตรงกันในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมความเหนี่ยวนำ \dot{V}_L จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของขนาดระหว่างแรงดัน \dot{V}_G กับ \dot{V}

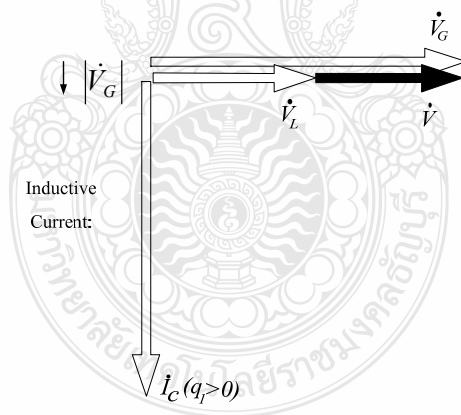


รูปที่ 2.15 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกระแส i_c

จากรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่า \dot{V}_L จะมีเฟสตรงกันกับ V ถ้า $|\dot{V}| < |\dot{V}_G|$ และในช่วงนี้กระแสอินดักทีฟ i_c จะถูกดึงจากระบบ A และในกรณีถ้า $|\dot{V}| > |\dot{V}_G|$ ส่งผลให้ \dot{V}_L จะมีเฟสตรงกันข้าม \dot{V} และในช่วงนี้กระแสคาปาซิทีฟ i_c จะถูกดึงจากระบบ A โดยทั่วไปแล้วกระแสรีแอกทีฟ i_c จะกำเนิดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ($q_i > 0$) บังคับให้ลดขนาดของแรงดันที่บัสที่ถูกควบคุม (บัส a) ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ขนานดึงกระแสคาปาซิทีฟ ($q_i < 0$) จะส่งผลให้แรงดันที่บัสที่ถูกควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นถึงหลักการประยุกต์ใช้งาน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการรักษาระดับแรงดันที่บัสควบคุม

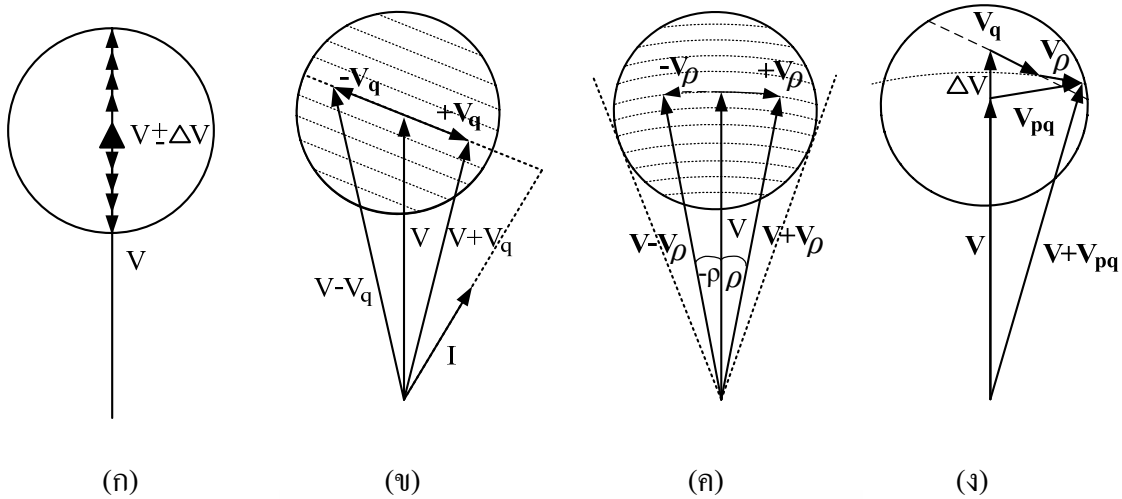


รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของรูปที่ 2.14

การทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาบนพื้นฐานของการชดเชยแบบขนาน การชดเชยแบบอนุกรม และการรักษามุมเฟส นั้น อุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสามารถตอบสนองทุกฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ได้ และสามารถควบคุมได้หลายวัตถุประสงค์ โดยการแทรกแรงดัน V_{pq} ที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและมุมเฟสเข้ากับระบบไฟฟ้า ฟังก์ชันการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถอธิบายได้โดยเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เฟสเซอร์แสดงฟังก์ชันการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของแรงดันที่แทรกเข้าไปในระบบไฟฟ้าในลักษณะที่มีเฟสตรงกันหรือตรงข้ามกับแรงดันของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) ส่วนแรงดันส่วนเพิ่ม V_{pq} จะมีค่าเท่ากับ $\pm\Delta V$ ที่มุมเฟสของแรงดันเป็น 0 องศา ($\rho=0$) ฟังก์ชันการทำงานนี้ทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้

การชดเชยอิมพีแดนซ์ของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข) โดยที่แรงดัน V_{pq} จะมีค่าเท่ากับ V_q จะแทรกเข้าไปในลักษณะตั้งฉากกับกระแสในสายส่ง (I) ฟังก์ชันการทำงานในลักษณะนี้จะคล้ายกับการชดเชยคาปาซิทีฟและอินดักทีฟแบบอนุกรมของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แรงดันอนุกรมนี้สามารถรักษาให้คงที่ตามต้องการโดยไม่ขึ้นกับกระแสในสายส่ง หรือสามารถเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของกระแสในสายส่งเหมือนกับการชดเชยด้วย TCSC ก็ได้

การรักษามุมเฟสแสดงในรูป (ค) โดยที่แรงดัน V_{pq} จะมีค่าเท่ากับ V_ρ ซึ่งแทรกเข้าไปในระบบ โดยมีเฟสสัมพันธ์กันกับแรงดันอ้างอิง V_s เป็นมุม ρ ซึ่งมุม ρ สามารถควบคุมได้ตามต้องการ โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน ดังนั้น ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมจึงสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรักษามุมเฟสได้

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในลักษณะหลายฟังก์ชันนี้สามารถทำได้โดยการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว การชดเชยอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่ง และการเลื่อนเฟสไปพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 2.17(ง) โดยที่แรงดันไฟฟ้า $V_{pq} = \Delta V + V_q + V_\rho$ ซึ่งเป็นลักษณะที่โดดเด่นของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

ความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถแสดงให้เห็นละเอียดมากยิ่งขึ้นด้วยลักษณะคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน เทียบกับมุมของกำลังไฟฟ้าในสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.16 กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) 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 $V_{pq} = 0$ สมการที่ 2.10 สามารถอธิบายด้วยระบบที่ไม่มีการชดเชยดังนี้

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

ถ้า $V_{pq} \neq 0$ จะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังนี้

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

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

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

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

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถหาได้ดังนี้

$$P(\delta, \rho) = P_0(\delta) + P_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} \sin \delta - \frac{V V_{pq}}{X} \cos \left(\frac{\delta}{2} + \rho \right) \quad (2.13)$$

และ

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

โดยที่

$$P_0(\delta) = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (2.15)$$

และ

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

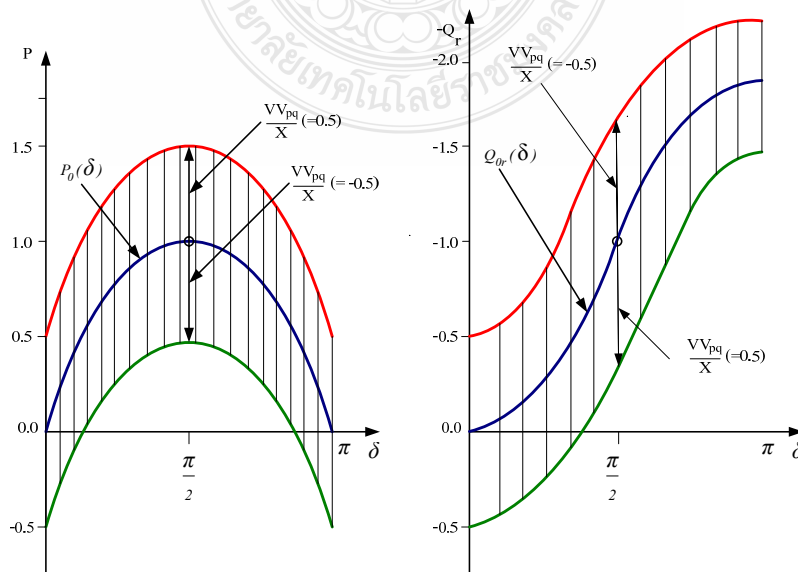
เป็นลักษณะของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่มีการชดเชยที่มุมของกำลังไฟฟ้า (δ) ที่กำหนด มุมของแรงดันชดเชย (ρ) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0 ถึง 2π ($0 \leq \rho \leq 2\pi$) ที่ทุกค่าของมุมของกำลังไฟฟ้าซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0 ถึง π ($0 \leq \delta \leq \pi$) ในขณะที่ $P_{pq}(\rho)$ และ $Q_{pq}(\rho)$ สามารถควบคุมได้ระหว่าง $-VV_{pq}/X$ และ $+VV_{pq}/X$ โดยไม่ขึ้นกับมุมของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริง P สามารถควบคุมได้ระหว่าง

$$P_0(\delta) - \frac{VV_{pq,max}}{X} \leq P(\delta) \leq P_0(\delta) + \frac{VV_{pq,max}}{X} \quad (2.17)$$

และกำลังไฟฟ้าเสมือน Q สามารถควบคุมได้ระหว่าง

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

ที่ทุกค่าของมุมของกำลังไฟฟ้า δ กำลังไฟฟ้าจริง P และกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการชดเชยเทียบกับมุมของกำลังไฟฟ้า δ แสดงดังในรูปที่ 2.18 โดยที่ความกว้างของย่านการควบคุมสำหรับกำลังไฟฟ้าที่ส่งในสายส่งจะไม่ขึ้นอยู่กับมุมของกำลังไฟฟ้า จากรูปแสดงถึงความสามารถที่โดดเด่นในการประยุกต์ใช้งาน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สำหรับควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ยังแสดงถึงความสามารถในการใช้ประโยชน์สำหรับส่งเสริมเสถียรภาพชั่วคราวและการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย



รูปที่ 2.18 กำลังไฟฟ้าที่มีการชดเชยเทียบกับมุมของกำลังไฟฟ้า δ

2.5 สรุปผลการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการทํางาน การควบคุม และการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบฮีดรอนได้กับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีอุปกรณ์ที่นำเสนอคือ ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบขนาน ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบผสม โดยการทำงานของตัวควบคุมแบบอนุกรมสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ในลักษณะการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับการทํางานตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบขนานจะอยู่ในลักษณะการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเสมือนกับระบบโดยการดูดกลืนหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกับระบบไฟฟ้า จากข้อดีของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรมและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบขนาน จึงได้นำมาต่อรวมกันเป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบผสมทำให้สามารถทํางานครอบคลุมทุกฟังก์ชันการทํางาน เพื่อนำไปจำลองการทํางานในบทที่ 3 ต่อไป



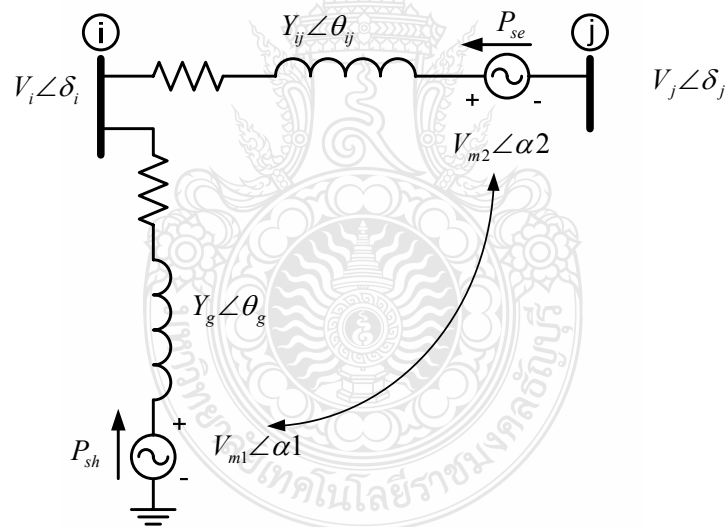
บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

3.1 บทนำ

จากความต้องการการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นนั้น ทำให้ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีความซับซ้อนขึ้น การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง เช่นเดียวกัน ดังนั้นเพื่อศึกษาการทำงาน การควบคุม กำลังไฟฟ้าในระบบด้วยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น จึงได้จำลองการทำงานก่อนการนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

จากแบบโครงสร้างของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถเขียนเป็นวงจรมุมูลของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ซึ่งอ้างอิงแบบจำลอง VSC ซึ่งจะแทนด้วยหม้อแปลงแบบขนานและอนุกรมในตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ด้วยอิมพีแดนซ์สมมูลต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรมุมูลของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

จากรูปที่ 3.1 มีตัวแปรควบคุมเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ระบบไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม อีก 4 ตัว คือ $|V_{m1}|$, $|V_{m2}|$, α_1 และ α_2 ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าผ่าน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม นั้น สามารถทำการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริง, กำลังไฟฟ้าเสมือน ที่ไหลในสายส่งที่เชื่อมโยงระหว่างบัส i - j และขนาดของแรงดันที่บัส i ตามที่เราต้องการได้

จากวงจรสมมูลของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในรูปที่ 3.1 สามารถอธิบาย กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ฉีดเข้าสู่บัสที่เกี่ยวข้อง และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายแรงดัน VSC ได้ ดังต่อไปนี้

- กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ฉีดเข้าสู่บัสต้นทาง (บัส i)

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

โดยที่

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

- กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ฉีดเข้าสู่บัสปลายทาง (บัส j)

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

โดยที่

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

- กำลังไฟฟ้าจริงที่แหล่งจ่ายแรงดัน V_{m1} จ่ายเข้าสู่ระบบ

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

- กำลังไฟฟ้าจริงที่แหล่งจ่ายแรงดัน V_{m2} จ่ายเข้าสู่ระบบ

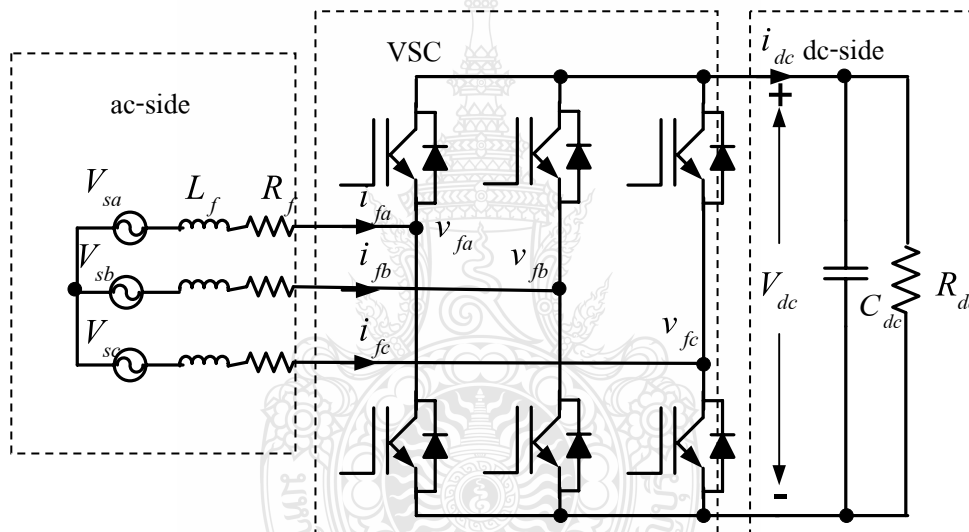
$$P_{sh} = |V_{m1}|^2 |Y_g| \cos \theta_g - |V_{m1}| |V_i| |Y_g| \cos(\alpha_1 - \delta_i - \theta_g) \quad (3.6)$$

เนื่องจากอุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม สามารถควบคุมการไหลของ กำลังไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง โดยการรักษาระดับแรงดันที่บัสทำได้โดยการควบคุม ของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในส่วนที่ต่อขนาน และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นจะทำได้โดยการควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในส่วนที่ต่ออนุกรม

ดังนั้นเพื่อให้สามารถทราบถึงพฤติกรรมการทำงานและการออกแบบของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมได้ง่ายขึ้น ในบทนี้จึงได้ดำเนินการจำลองการทำงานของตัวชดเชย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมแยกเป็น 2 ส่วนก่อน คือการจำลองตัวชดเชยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน และการจำลองตัวชดเชย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรม แล้วจึงดำเนินการจำลองการควบคุมการทำงานตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

3.2 แบบจำลองแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

ส่วนนี้จะอธิบายและวิเคราะห์ถึงแบบจำลองในส่วนของแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแบบพัลส์วิธมอดดูเลชันหรือพีดีบีบลิวเอ็ม(PWM) โดยมีคาร์รีแอกแทนซ์และอินดักแทนซ์ในระบบสายส่งรวมอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแบบพีดีบีบลิวเอ็ม

จากรูปที่ 3.2 วงจรประกอบด้วย IGBT 6 ตัว และมี C ต่อขนานเพื่อเป็นตัวกรองสัญญาณระลอก (C_{dc}) ณ ตำแหน่งบัสแรงดันกระแสตรง (dc-link) โดยมีค่า R_{dc} ต่อขนานกับ C_{dc} เพราะที่ต้องการให้ C_{dc} มีการสูญเสียค่ากำลังไฟฟ้าบ้างเล็กน้อยเพื่อให้ประยุกต์ใช้กับงานจริงได้ แรงดันแหล่งจ่าย คือ V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} อยู่ในส่วนของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีตัวความต้านทาน R_f และ ตัวเหนี่ยวนำ L_f ต่ออนุกรมอยู่ เมื่อกระแสไฟฟ้า i_{fa}, i_{fb}, i_{fc} ผ่าน L_f เข้าไปยังจุดต่อของ VSC แรงดันตกคร่อม ณ จุดนั้น คือ v_{fa}, v_{fb}, v_{fc} จากแบบจำลอง สามารถเขียนวิเคราะห์เป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟ (KVL) ในส่วนของด้านกระแสกลับได้ดังนี้

$$V_{sa} - v_{fa} = R_f i_{fa} + L_f \frac{di_{fa}}{dt} \quad (3.7)$$

$$V_{sb} - v_{fb} = R_f i_{fb} + L_f \frac{di_{fb}}{dt} \quad (3.8)$$

$$V_{sc} - v_{fc} = R_f i_{fc} + L_f \frac{di_{fc}}{dt} \quad (3.9)$$

ในการคำนวณนี้คิดในเชิงอุดมคติ จึงทำให้ไม่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ที่อาจเกิดขึ้นที่ VSC ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าด้านกระแสกลับ และ ด้านกระแสตรง จึงมีความสมดุลกันแสดงโดยสมการที่ 3.10

$$v_{fa} i_{fa} + v_{fb} i_{fb} + v_{fc} i_{fc} = V_{dc} i_{dc} \quad (3.10)$$

ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ(KCL) ในส่วนของ dc-side ของตัวแปลงผันแรงดัน

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{R_{dc}} \quad (3.11)$$

$$v_{fa} i_{fa} + v_{fb} i_{fb} + v_{fc} i_{fc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}^2}{R_{dc}} \quad (3.12)$$

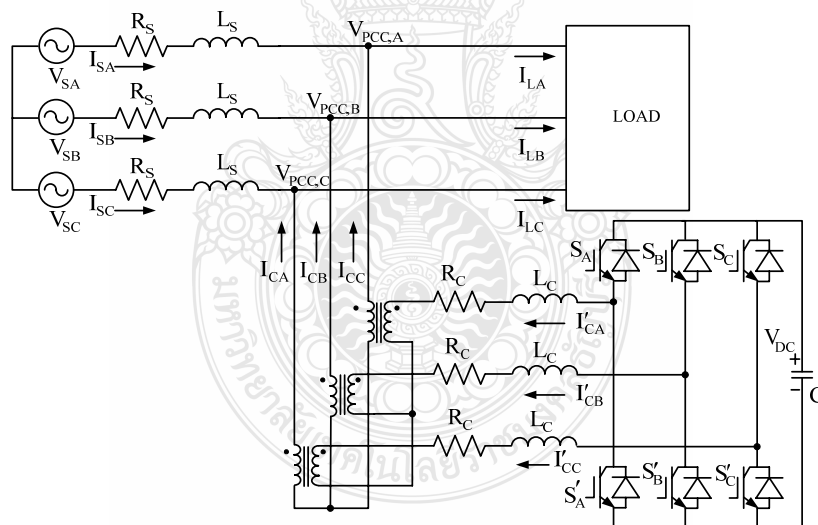
VSC ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สัญญาณไซน์แบบพัลส์วิธมอดดูเลชัน จากนั้นหาค่า ความสัมพันธ์ระหว่าง v_{Fa}, v_{Fb}, v_{Fc} และสัญญาณมอดดูเลชัน (m_a, m_b, m_c) ของแรงดันทั้ง 3 เฟส ได้สมการดังนี้

$$v_{fa} = m_a \frac{V_{dc}}{2}, v_{fb} = m_b \frac{V_{dc}}{2}, v_{fc} = m_c \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.13)$$

3.3 การจำลองตัวชดเชย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

ตัวชดเชยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในส่วนขนานเป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต่อขนานกับระบบสามารถกำเนิดและดูดกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ โดยกำลังไฟฟ้าเสมือนนี้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยทั่วไปแล้ว ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน ถูกใช้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่บัสเชื่อมต่อก่อนอกจากนี้

ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน ยังสามารถนำไปใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบได้อีกด้วย โครงสร้างและการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.3 จากรูปชุดแปลงผันของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะมีลักษณะเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าได้รับจาก คาปาซิเตอร์กระแสตรง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสมมูล 3 เฟสเป็นแรงดันขาออกโดยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนี้จะอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าของระบบที่จุดเชื่อมต่อ (V_{PCC}) การเชื่อมต่อระหว่างชุดแปลงผันกับระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อผ่านรีแอคเตอร์เชื่อมต่อ (L_C) ส่วน R_C แทนการสูญเสียภายในของชุดแปลงผัน ในกรณีนี้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะสามารถแลกเปลี่ยนได้เฉพาะกำลังไฟฟ้าเสมือนกับระบบเท่านั้น ในส่วนการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงนั้นไม่สามารถทำได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนานสามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนก็สามารถทำได้โดยนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เช่น แบตเตอรี่มาเป็นแหล่งจ่ายแทนคาปาซิเตอร์ ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

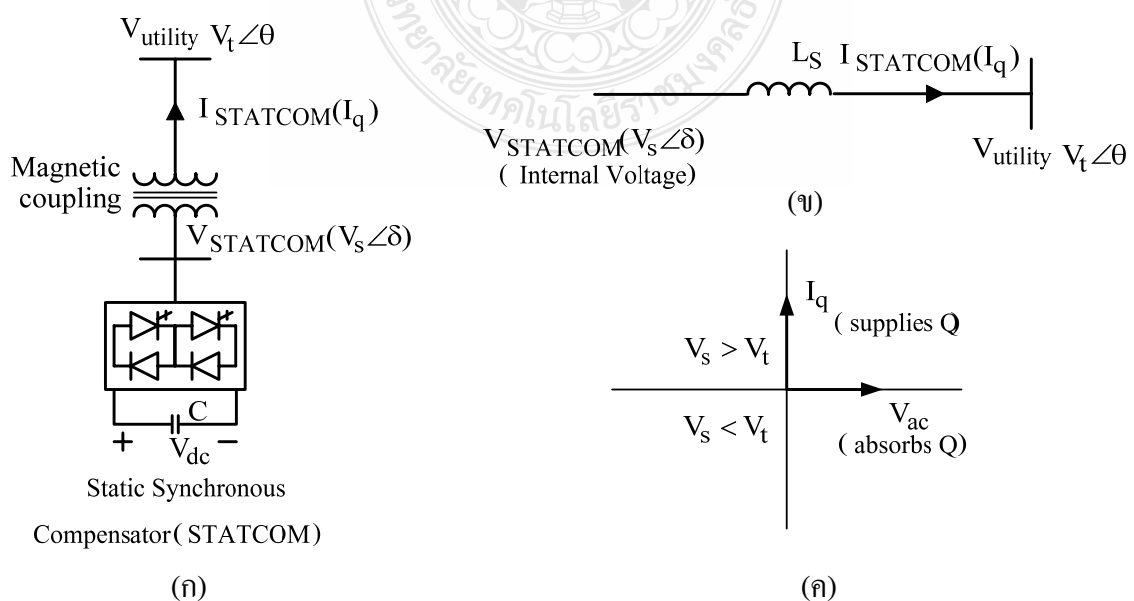


รูปที่ 3.3 โครงสร้างและการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

อย่างไรก็ตามการศึกษาการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาการนำ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน มาใช้เพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะไม่พิจารณาในส่วนของการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริง หลักการทำงานและการควบคุม ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

3.3.1 หลักการทำงานและการควบคุม ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

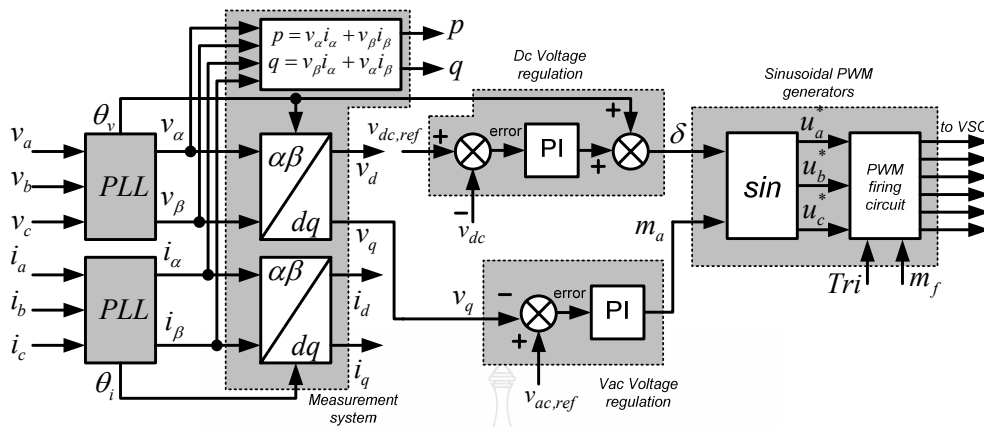
ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควบคุมได้ สามารถกำเนิดและดูดกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ตามต้องการโดยการควบคุมการทำงานของชุดแปลงผัน ไดอะแกรมเส้นเดียวของวงจรกำลังของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน แสดงในรูปที่ 3.4 (ก) ซึ่งชุดแปลงผันของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน มีลักษณะเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดันเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านแม่เหล็กเชื่อมโยง (magnetic coupling) แม่เหล็กเชื่อมโยงอาจเป็นตัวรีแอคเตอร์หรือรีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง ในรูปที่ 3.4 (ข) ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน จะถูกมองเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถปรับค่าได้อยู่หลังรีแอคแตนซ์ การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเสมือนระหว่าง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน (V_s) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ค) พิจารณาจากรูป เมื่อขนาดแรงดันขาออก V_s มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้า (V_t) จะทำให้กระแส I_q ไหลจากชุดแปลงผันผ่านรีแอคเตอร์เชื่อมโยงไปยังระบบไฟฟ้า ในกรณีนี้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะทำหน้าที่กำเนิดกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้า ในขณะที่เมื่อขนาดแรงดันขาออก V_s มีค่าลดลงต่ำกว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบ V_t จะทำให้กระแส I_q ไหลจากระบบไฟฟ้าผ่านรีแอคเตอร์เชื่อมโยงไปยังชุดแปลงผัน ซึ่งในกรณีนี้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะทำหน้าที่ดูดกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบไฟฟ้า และหากแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง (V_s และ V_t) มีค่าเท่ากันจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งในกรณีนี้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะอยู่ในสภาวะลอยตัว



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมหลักการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

นอกจากนี้การปรับมุมเฟสระหว่างแรงดันขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน และแรงดันของระบบไฟฟ้านั้นเป็นการควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่าง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน และระบบไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่า ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบไฟฟ้าได้ (ในกรณีที่ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อที่บัสกระแสตรงของชุดแปลงผัน) ถ้าแรงดันขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน นำหน้าแรงดันไฟฟ้า ของระบบ และในทำนองเดียวกัน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน สามารถดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบไฟฟ้าได้ถ้าแรงดันขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า แบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน ล้าหลังแรงดันของระบบไฟฟ้า กลไกการกำเนิดและการดูดกลืนกำลังไฟฟ้า เสมือนของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะพิจารณาว่าเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและขาเข้าของชุดแปลงผัน ซึ่งชุดแปลงผันเป็นสวิตช์เชื่อมต่อระหว่างวงจร กระแสตรงขาเข้ากับวงจรกระแสสลับขาออก ดังนั้นกำลังไฟฟ้ายรวมที่ขั้วขาออกจะต้องเท่ากับกำลังไฟฟ้า รวมที่ขั้วขาเข้า (เมื่อไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสีย) ตัวอย่างเช่น ในขณะที่ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า แบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งในกรณีนี้กำลังไฟฟ้าจริง จากวงจรกระแสตรงขาเข้าและจากวงจรไฟฟ้ากระแสสลับขาออกจะมีค่าเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงสวิตช์สารกึ่งตัวนำของชุดแปลงผันจะมีการสูญเสียภายใน ดังนั้นพลังงานที่สะสม ในตัวคาปาซิเตอร์กระแสตรงจะถูกใช้สำหรับการสูญเสียภายในของชุดแปลงผันส่งผลให้แรงดัน ที่คาปาซิเตอร์ลดต่ำลง จึงจำเป็นจะต้องมีการรักษาระดับแรงดันที่ตัวคาปาซิเตอร์ให้คงที่ที่ค่าพิกัด โดยการควบคุมมุมเฟสของแรงดันขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ให้ล้าหลังแรงดันของระบบไฟฟ้าเพื่อให้ตัวคาปาซิเตอร์เก็บสะสมพลังงานทำให้แรงดันไฟฟ้า กระแสตรงที่ตัวคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้น ในกรณีเช่นนี้ชุด ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการสูญเสียภายใน ชุดแปลงผันและเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมคาปาซิเตอร์ หลักการนี้สามารถ นำไปใช้ในการควบคุมการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมคาปาซิเตอร์ได้ด้วยการควบคุม มุมเฟสระหว่างแรงดันขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน และแรงดัน ของระบบไฟฟ้า ระบบควบคุมจะประกอบด้วยชุดติดตามเฟสแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ ชุดเครื่องมือ วัตถุประสงค์ ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมคาปาซิเตอร์ ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่บัสเชื่อมต่อ และชุดกำเนิดสัญญาณพัลส์ PWM ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่บัสเชื่อมต่อ นั้นจะเป็นการควบคุมขนาดของสัญญาณไซน์อ้างอิง m_a ในขณะที่การควบคุม แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คาปาซิเตอร์จะเป็นการควบคุมมุมเฟสของสัญญาณไซน์อ้างอิง δ

ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน มีขนาดและมุมเฟสตามต้องการ โดยไดอะแกรมของระบบควบคุมสามารถเขียนได้ดังในรูปที่ 3.5

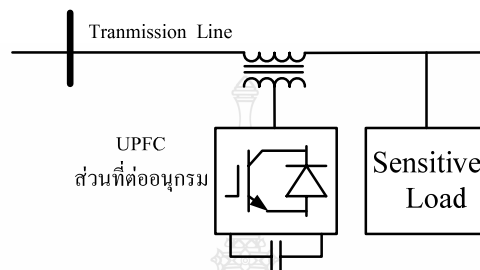


รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมระบบควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน

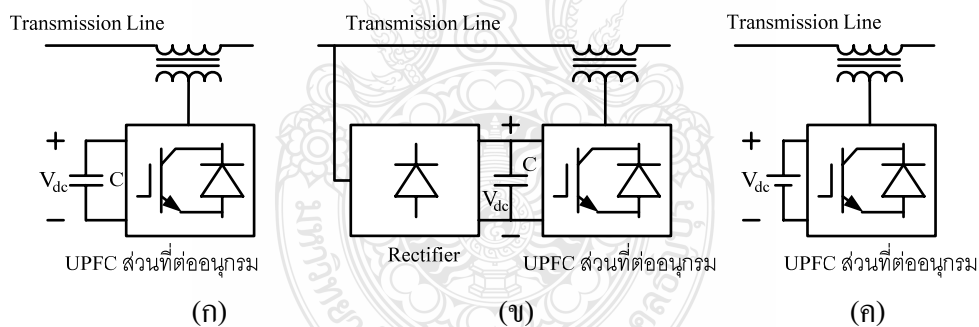
3.4 การจำลองตัวชดเชยแบบ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม

ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม เป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับป้องกัน โหลดที่มีความไวสูงจากความผิดปกติทางแหล่งจ่าย หลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์ชดเชยนี้เป็นการแทรกแรงดันอนุกรมเข้ากับสายป้อน ซึ่งสามารถคืนสภาพแรงดันให้กับโหลดได้ทั้งขนาดและมุมเฟสถึงแม้ว่าแรงดันแหล่งจ่ายจะมีลักษณะสมดุก็ตาม อุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม จะใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์และใช้ชุดกำเนิดสัญญาณพัลส์แบบ PWM เป็นชุดกำเนิดสัญญาณให้กับ IGBT ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม สามารถควบคุมให้กำเนิดหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ ซึ่งการควบคุมทั้งสองอย่างนี้เป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม ยังสามารถกำเนิดแรงดันแบบ 3 เฟสสมดุ ซึ่งขนาดของแรงดันและมุมเฟสสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ ในส่วนของแหล่งจ่ายกระแสตรงของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม อาจใช้แหล่งจ่ายพลังงาน เช่นแบตเตอรี่ หรือตัวสะสมพลังงานเช่น คาปาซิเตอร์ก็ได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนกับระบบไฟฟ้าจะต้องทำการติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงานกระแสตรงให้กับ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม

การเชื่อมต่อ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม เข้ากับระบบจำหน่าย แสดงในรูปที่ 3.6 จากรูปจะเห็นว่า ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม ต่ออนุกรม เข้ากับสายป้อนที่ 2 เพื่อป้องกัน โหลดที่มีความไวสูงจากการเกิดแรงดันตก/เกินช่วงสั้น เมื่อเกิดความผิดปกติที่จุด A หรือที่จุด B ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม มีหลายรูปแบบ ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่แหล่งจ่ายพลังงานด้านกระแสตรงของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม ซึ่งอาจจะเป็นตัวสะสมพลังงาน ชุคเรียงกระแส และแหล่งจ่ายพลังงานดังแสดง ในรูปที่ 3.7 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรมเข้ากับระบบ

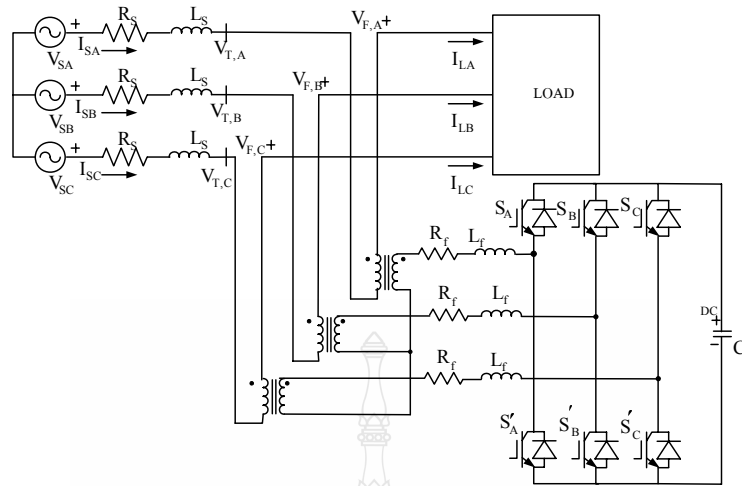


รูปที่ 3.7 โครงสร้าง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม

3.4.1 การควบคุมการทำงาน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม

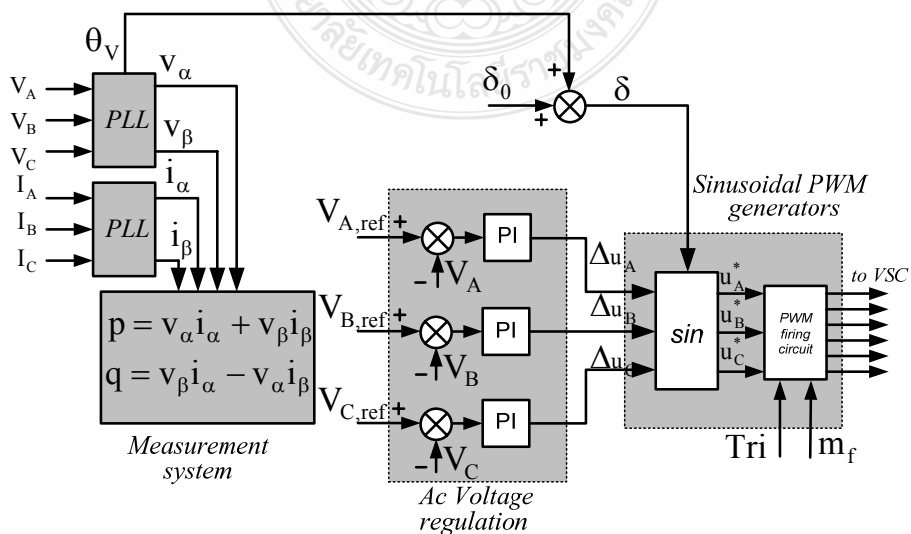
การควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือสัญญาณมอดูเลชันสำหรับการกำเนิดแรงดันที่จะแทรกเข้าสายป้อน โดยทั่วไปจะใช้สัญญาณมอดูเลชันของแรงดันที่ชั่วเป็นสัญญาณอ้างอิง อย่างไรก็ตามสัญญาณมอดูเลชันอ้างอิง นี้จะต้องทำให้มอดูเลชันแรงดันที่โหลดน้อยกว่ามอดูเลชันแรงดันที่ชั่วเล็กน้อยเพื่อป้องกันไม่ให้กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายกระแสตรงของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม วงจรของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม และการเชื่อมต่อกับระบบ

ได้แสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจาก ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม มีการควบคุม ในลักษณะแยกเฟสจึงเชื่อมต่อกับระบบ โดยใช้หม้อแปลงแบบเฟสเดียว 3 ตัวต่ออนุกรมกับสายป้อน



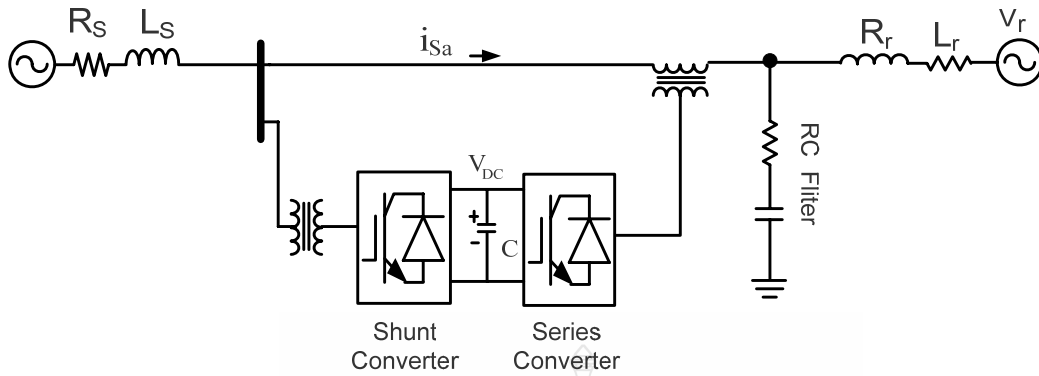
รูปที่ 3.8 วงจรของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม และการเชื่อมต่อกับระบบ

โครงสร้าง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม ที่ใช้ในการจำลองนี้ใช้ แหล่งจ่ายกระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม การควบคุมจึงมีเฉพาะในส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลคให้มีค่าคงที่ ที่ค่าพิกัดเท่านั้น ดังนั้นระบบควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม จึงประกอบด้วย ชุดติดตามเฟสแรงดันที่ขั้ว ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และชุดกำเนิดสัญญาณ พัลส์ PWM ดังแสดงในรูปที่ 3.9



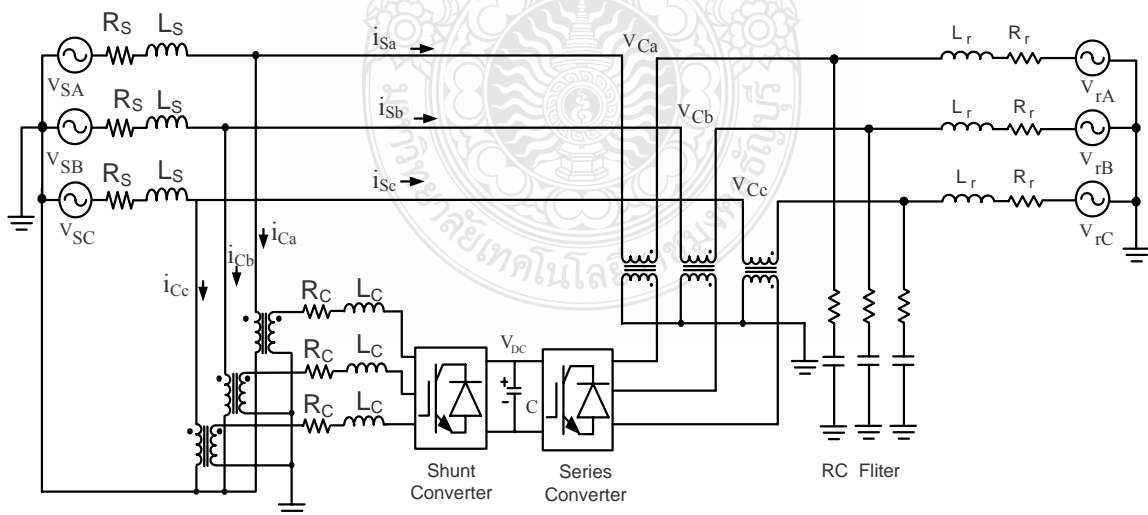
รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม

3.5 การออกแบบตัวชดเชย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ 3.10 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.10 นำมาจำลองการทำงานบนโปรแกรม ATP/EMTP ในการจำลองการทำงาน การควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยการควบคุมการไหลของ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ จากอีกบัสไปยังอีกบัส โดยกำหนดให้แรงดันที่บัส และมุมเฟส เท่ากันทั้งสองบัสดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมที่ใช้ในการจำลอง

3.5.1 การออกแบบตัวควบคุม

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าบิดดล (Instantaneous Power) จะใช้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (v_a, v_b และ v_c) และกระแสที่ไหลในสาย (i_a, i_b และ i_c) จะถูกแปลงให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้การแปลงสมการแบบ Clark ดังสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.15)

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ในระบบสามเฟสสามสายจะไม่พิจารณาองค์ประกอบลำดับศูนย์ (v_0 และ i_0)

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (3.16)$$

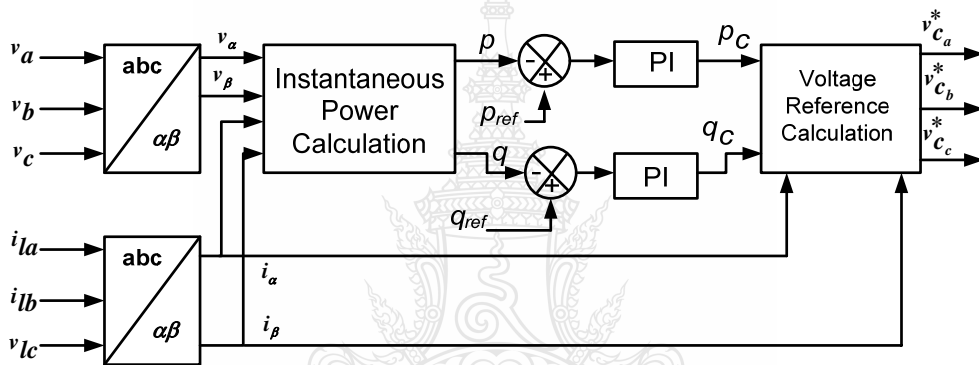
$$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} v_{c\alpha}^* \\ v_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_C \\ q_C \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ca}^* \\ v_{cb}^* \\ v_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c\alpha}^* \\ v_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

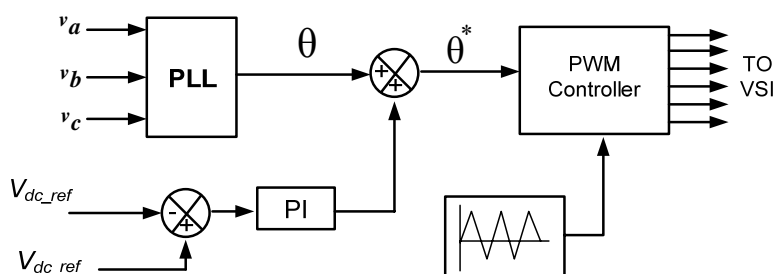
3.5.2 การควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

การควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม ประกอบด้วยชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แรงดันชดเชยจากสมการที่ (3.14) ถึง (3.19) สามารถเขียนบล็อกควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 บล็อกควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม

สำหรับการควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ประกอบด้วย ชุดติดตามเฟสแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดกำเนิดสัญญาณ PWM ดังแสดงในรูปที่ 3.13



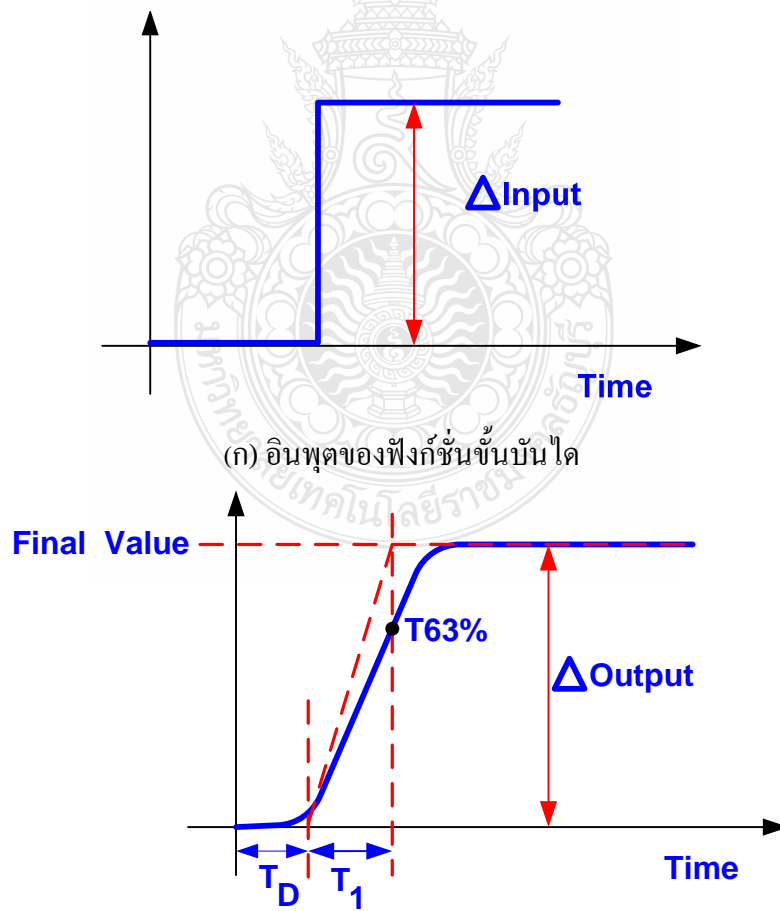
รูปที่ 3.13 บล็อกควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

3.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

จากชุดควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ในหัวข้อนี้กล่าวถึงวิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ชุดควบคุมแรงดันชดเชยอ้างอิง โดยจะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหาพารามิเตอร์ และการออกแบบระบบควบคุมไปพร้อมๆกันนี้

3.6.1 วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอโดยอาศัยพารามิเตอร์ของระบบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมที่ได้จากผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันได (Step Testing)

เนื่องจากระบบที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการหาพารามิเตอร์ ดังนั้นวิธีหาค่าพารามิเตอร์ที่ง่ายและเหมาะสมในการปฏิบัติจริง คือการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันได [8] ซึ่งจะเห็นจากแบบจำลองระบบที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP สามารถจำลองพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ และยังสามารถหาผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบได้โดยการปลดชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมแรงดันชดเชย ดังนี้



(ก) อินพุตของฟังก์ชันขั้นบันได

(ข) เอาต์พุตของตัวควบคุมจากการทดสอบด้วยฟังก์ชันขั้นบันได

รูปที่ 3.14 รูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุตจากการทดสอบด้วยวิธีการของฟังก์ชันขั้นบันได

จากรูปที่ 3. 14 (ก) เป็นภาพแสดงสัญญาณขาเข้าของฟังก์ชันขั้นบันได ซึ่งส่งผลให้มีลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม ดังรูปที่ 3.14(ข) ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของชุดควบคุมได้ดังนี้

$$K_r = \frac{\Delta output}{\Delta Input} \quad (3.20)$$

เมื่อพิจารณาจากรูปสัญญาณเอาต์พุตของชุดควบคุมในรูปที่ 3.14(ข) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบ First Order จะเห็นว่ามีค่าการหน่วงเวลาก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าของการหน่วงเวลา (T_D) และมีค่าคงที่ของเวลา (T_I) ดังนั้นสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G_i(s) = \frac{K_r e^{-sT_D}}{1 + sT_I} \quad (3.21)$$

เมื่อ $G_i(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิดลูป (Open Loop Transfer Function) ของระบบที่ชุดควบคุม พบว่าถ้าค่าของการหน่วงเวลามีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ของเวลา จึงประมาณว่าผลของการหน่วงเวลาเป็น First Order สองตัวต่อกัน ซึ่งเมื่อนำพารามิเตอร์มาเขียนเป็นสมการของระบบที่ชุดควบคุมได้ดังนี้

$$G_i(s) = \frac{K_r}{(1 + sT_I)(1 + sT_D)} \quad (3.22)$$

จากวิธีการ Modulus Optimum ในระบบที่มีลักษณะเป็น First Order ต่อกันสองตัวและค่าคงที่ของเวลาตัวใดตัวหนึ่งมีค่าคงที่ของเวลาของตัวที่เหลือ การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการควบคุมระบบนี้ ซึ่งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการ Modulus Optimum สามารถทำได้โดยวิธีการดังนี้

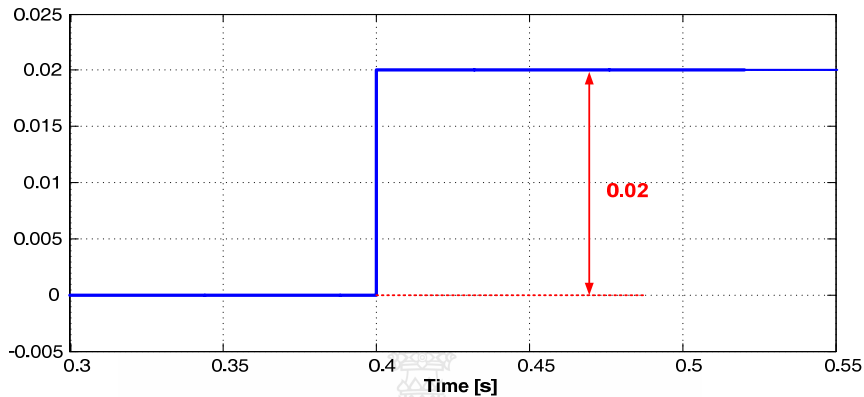
$$T_i = T_I \quad (3.23)$$

$$K_i = \frac{1}{T_I} \quad (3.24)$$

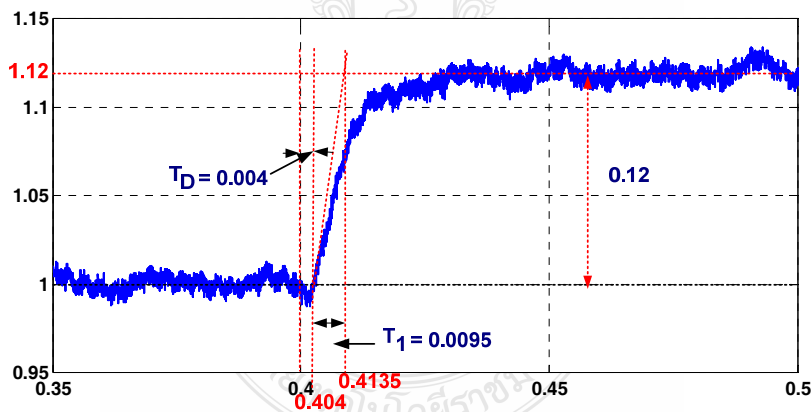
$$K_p = \frac{T_I}{2 \times K_r \times T_D} \quad (3.25)$$

3.6.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การหาผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบได้โดยการปลดชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แล้วป้อนสัญญาณขาเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดเข้าสู่ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าเท่ากับ 0.02 ดังรูปที่ 3.15(ก) ทำให้ได้สัญญาณขาออกของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 3.15(ข)



(ก) อินพุตของฟังก์ชันขั้นบันได



(ข) เอาต์พุตของชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 3.15 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 3. 15(ก) เป็นภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.022 p.u. ซึ่งส่งผลให้มีลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 3.15(ข) โดยสัญญาณที่ออกนี้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จุดเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.12 p.u. ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังนี้

$$K_r = \frac{\Delta_{output}}{\Delta_{Input}} = \frac{0.12}{-0.02} = -0.6$$

เมื่อพิจารณาจากรูปสัญญาณเอาต์พุตของชุดควบคุมในรูปที่ 3.15(ข) จะเห็นว่ามีการหน่วงเวลาก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าของการหน่วงเวลา (T_D) มีค่าประมาณ 0.004 หลังจากนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก 1 p.u. เป็น 1.12 p.u. ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบ First Order ซึ่งมีค่าคงที่ของเวลา (T_1) เท่ากับ 0.0095 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเขียนได้จากสมการที่ 3.21 ได้ดังนี้

$$G_i(s) = \frac{-0.6e^{-0.004s}}{1 + 0.0095s}$$

เมื่อ $G_i(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิดลูป (Open Loop Transfer Function) ของระบบที่ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง พบว่าค่าของการหน่วงเวลาที่มีค่าเท่ากับ 0.004 มีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ของเวลาที่มีค่าเท่ากับ 0.0095 จึงประมาณว่าผลของการหน่วงเวลาเป็น First Order สองตัวต่ออนุกรมกัน ซึ่งเมื่อนำพารามิเตอร์มาเขียนเป็นสมการของระบบที่ชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

$$G_i(s) = \frac{-0.6}{(1 + 0.0095s)(1 + 0.004s)}$$

จากสมการที่ (3.28) T_1 คือค่าคงที่ของเวลาของ First Order ที่มีค่ามากที่สุด และ T_D คือค่าคงที่เวลาของตัวที่เหลือ ทำให้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังนี้

$$T_i = T_1 = 0.0095$$

$$T_D = 0.004$$

$$K_i = \frac{1}{0.0095}$$

$$K_i = 105.263$$

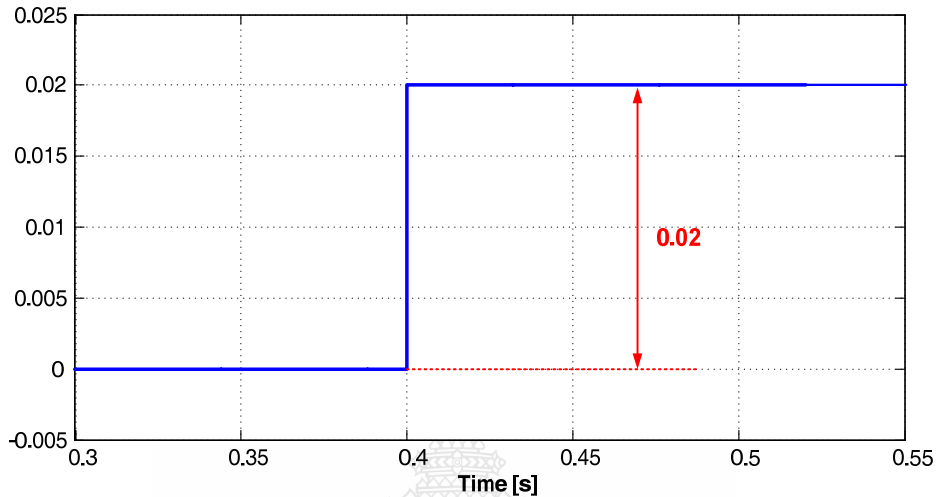
$$K_p = \frac{0.0095}{2 \times (-0.6) \times 0.004}$$

$$K_p = -1.97917$$

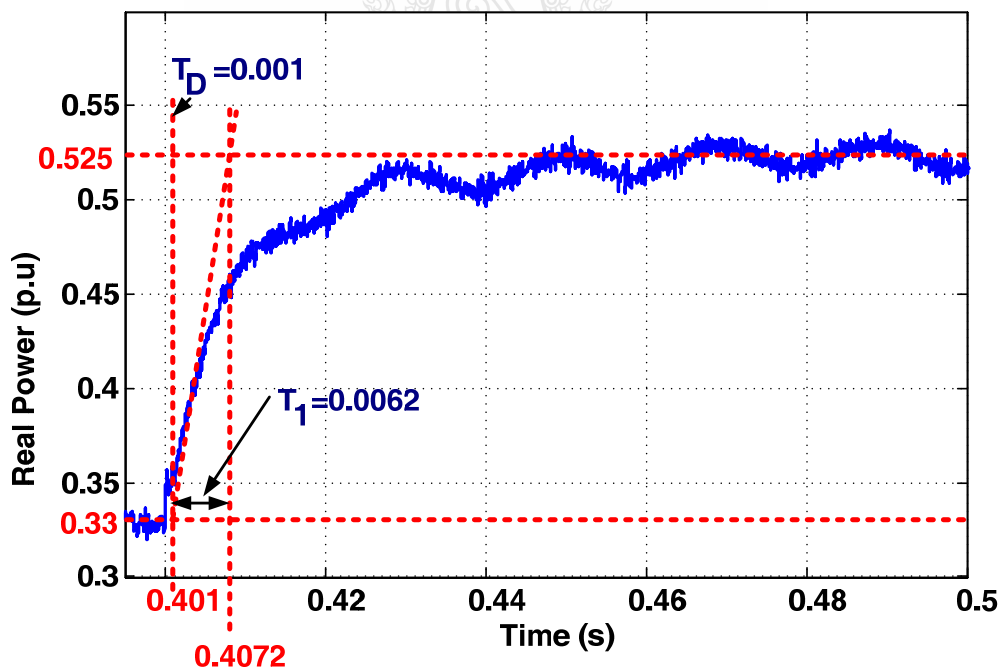
ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $K_p = -1.97917$, $K_i = 105.263$

3.6.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง

การหาผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบได้โดยการป้อนชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง แล้วป้อนสัญญาณขาเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดเข้าที่ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่มีค่าเท่ากับ 0.02 ดังรูปที่ 3.16 (ก) ทำให้ได้สัญญาณขาออกของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงดังรูปที่ 3.16 (ข)



(ก) อินพุตของฟังก์ชันขั้นบันได



(ข) เอาต์พุตของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง

รูปที่ 3.16 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง

จากรูปที่ 3.16 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง จากสมการที่ (3.20) ถึงสมการ (3.25) ดังนี้

$$K_r = \frac{\Delta output}{\Delta Input} = \frac{0.525 - 0.33}{0.02} = 9.75$$

$$G_i(s) = \frac{9.75}{(1 + 0.0062s)(1 + 0.001s)}$$

$$T_i = T_1 = 0.0062$$

$$T_D = 0.001$$

$$K_i = \frac{1}{0.0062}$$

$$K_i = 161.29$$

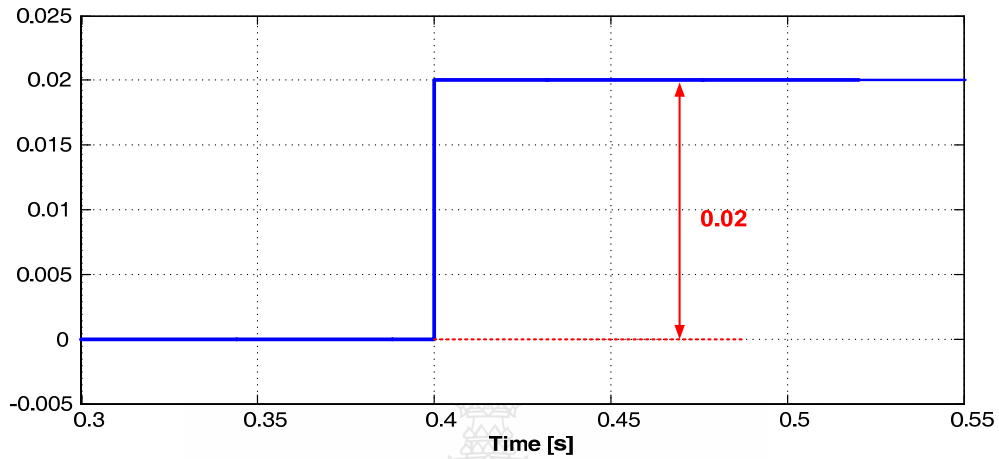
$$K_p = \frac{0.0062}{2 \times 9.75 \times 0.001}$$

$$K_p = 0.3175$$

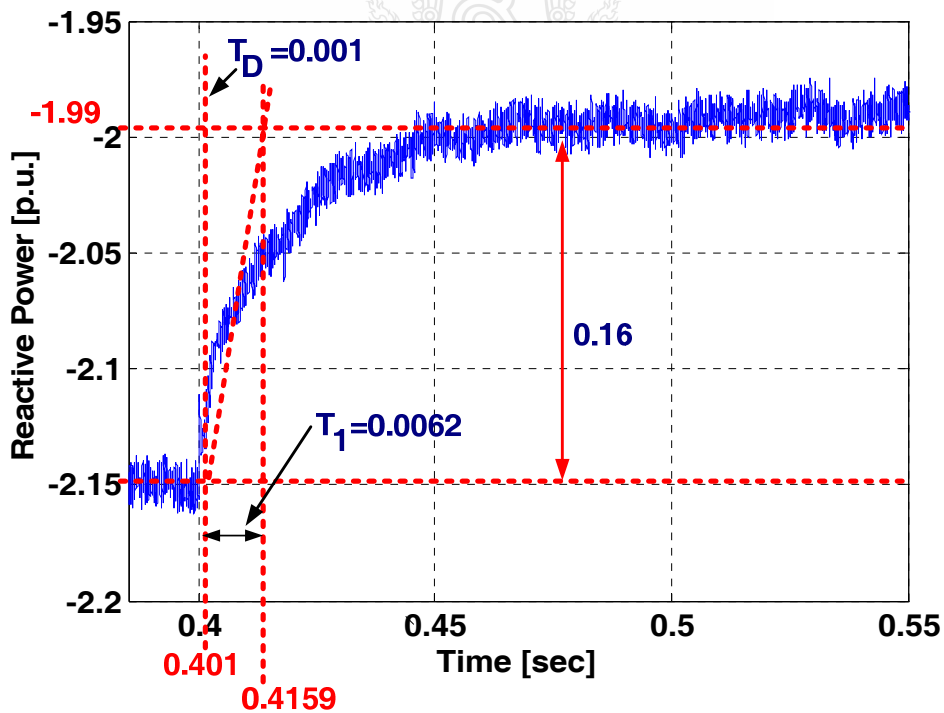
ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง $K_p = 0.3175$, $K_i = 161.29$

3.6.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

การหาผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบได้โดยการปลดชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน แล้วป้อนสัญญาณขาเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดเข้าที่ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่มีค่าเท่ากับ 0.02 ดังรูปที่ 3.17 (ก) ทำให้ได้สัญญาณขาออกของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงดังรูปที่ 3.17 (ข)



(ก) อินพุตของฟังก์ชันขั้นบันได



(ข) เอาต์พุตของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

รูปที่ 3.17 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

จากรูปที่ 3.17 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน จากสมการที่ (3.20) ถึงสมการ (3.25) ดังนี้

$$K_r = \frac{\Delta output}{\Delta Input} = \frac{-1.99 - (-2.15)}{0.02} = 7.75$$

$$G_i(s) = \frac{7.75}{(1 + 0.0149s)(1 + 0.001s)}$$

$$T_i = T_1 = 0.0149$$

$$T_D = 0.001$$

$$K_i = \frac{1}{0.0149}$$

$$K_i = 67.114$$

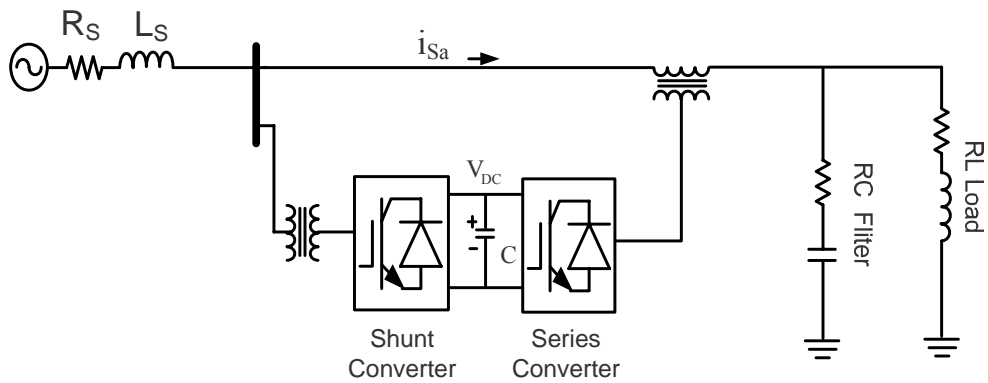
$$K_p = \frac{0.0149}{2 \times 7.75 \times 0.001}$$

$$K_p = 0.96129$$

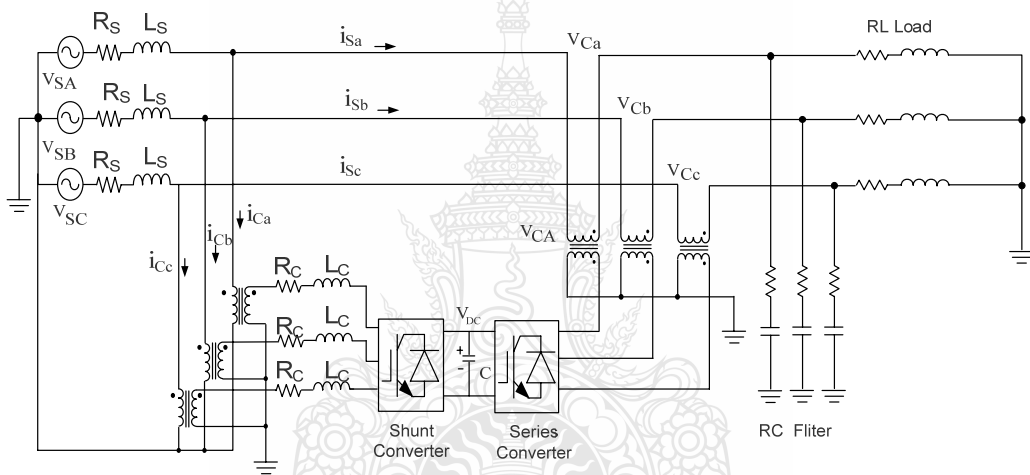
ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน $K_p = 0.96129$, $K_i = 67.114$

3.7 การออกแบบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดันที่โหลด

ระบบทดสอบที่นำมาจำลองเพื่อศึกษาการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ประกอบด้วยแหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม และโหลด RL โดยเชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ชานเข้ากับที่ต่อแหล่งจ่ายผ่านทางหม้อแปลงชานและต่อกอนเวอร์เตอร์อนุกรมเข้ากับสายส่งที่ต่อไปยังโหลดผ่านทางหม้อแปลงอนุกรมโดยกอนเวอร์เตอร์ทั้งสองส่วนต่อรวมกันด้วยตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 โดยระบบจำลองให้มีความดันตกช่วงสั้นๆ ทางด้านแหล่งจ่าย จะทำให้ออนเวอร์เตอร์ชานดึงกำลังไฟฟ้าจริงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและจ่ายออกมาทางกอนเวอร์เตอร์อนุกรมเพื่อแทรกกำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปในระบบผ่านทางหม้อแปลงอนุกรม ทำให้ชดเชยแรงดันที่จ่ายให้โหลดได้



รูปที่ 3.18 โครงสร้างระบบที่ใช้ในการจำลองการชดเชยแรงดัน



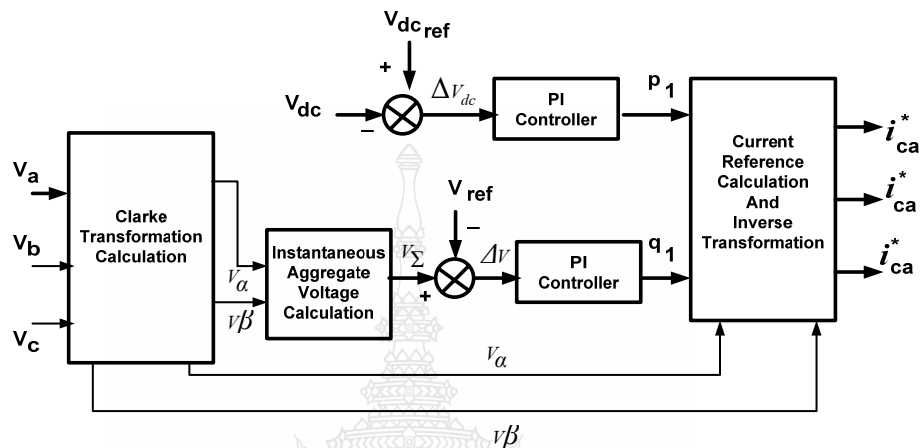
รูปที่ 3.19 วงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดัน

ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมสามารถออกแบบโดยใช้ทฤษฎีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน (p-q Theory) โดยใช้สมการที่ (3.26) ถึง สมการที่ (3.28) สำหรับควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน ดังรูปที่ 3.20

$$v_{\Sigma} = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 + v_0^2} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_l \\ q_l \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

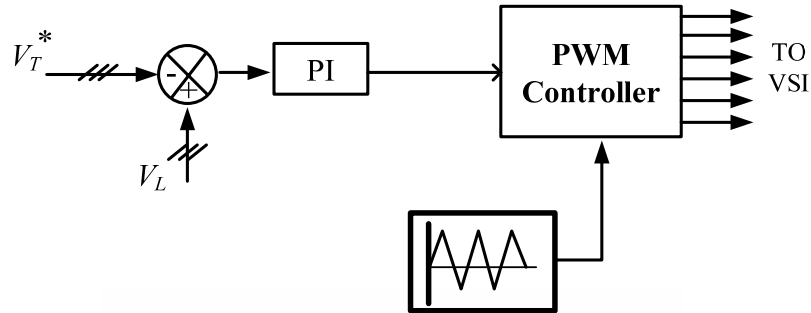
$$\begin{bmatrix} i^*_{Ca} \\ i^*_{Cb} \\ i^*_{Cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^*_{C\alpha} \\ i^*_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.20 ชุดควบคุมกระแสสำหรับตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน

จากรูปที่ 3.20 เป็นชุดควบคุมกระแสอ้างอิงสำหรับตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ประกอบด้วยส่วนที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากจุดเชื่อมโยงกระแสตรงลบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงนำผลต่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปควบคุมในตัวควบคุมแบบ PI ผลที่ได้คือกำลังไฟฟ้าจริงบังคับ และอีกส่วนคือชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จากบัสที่เชื่อมต่อ แปลงให้อยู่ในแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการของคลาร์ค นำแรงดันบนแกน $\alpha\beta$ คำนวณหาขนาดของแรงดันรวมโดยใช้สมการที่ 3.26 แล้วนำไปลบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอ้างอิงจากชุดติดตามเฟส เพื่อนำผลต่างของแรงดันไปควบคุมในตัวควบคุมแบบ PI ผลที่ได้คือเป็นกำลังไฟฟ้าเสมือนบังคับ กำลังไฟฟ้าเสมือนและกำลังไฟฟ้าจริงนี้นำไปคำนวณหากระแสอ้างอิงที่จะนำไปควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน ดังสมการที่ 3.27 และสมการที่ 3.28

จากรูปที่ 3.21 ประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วที่ได้จากชุดติดตามเฟสเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเพื่อเข้าไปควบคุมในตัวควบคุมแบบ PI นำผลที่ได้เข้าไปในชุดควบคุมพัลส์วิดุมอดูละชั้นเพื่อควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม



รูปที่ 3.21 ชุดควบคุมสำหรับตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม

3.8 สรุปท้ายบท

ในบทนี้แสดงให้เห็นถึงวิธีการออกแบบสร้างชุดควบคุมในส่วนต่างๆ ของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม แบบจำลองชุดควบคุม โดยสร้างชุดควบคุมด้วยทฤษฎีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน จากนั้นจึงนำชุดควบคุมดังกล่าวไปทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจำลองการทำงานเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ และการชดเชยแรงดันที่โหลดเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราวแบบสมมาตร และทำการแก้ปัญหาโดยการนำตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมไปทำการชดเชยแรงดันให้ระบบมีความปกติ ซึ่งจะแสดงในบทที่ 4 ต่อไป

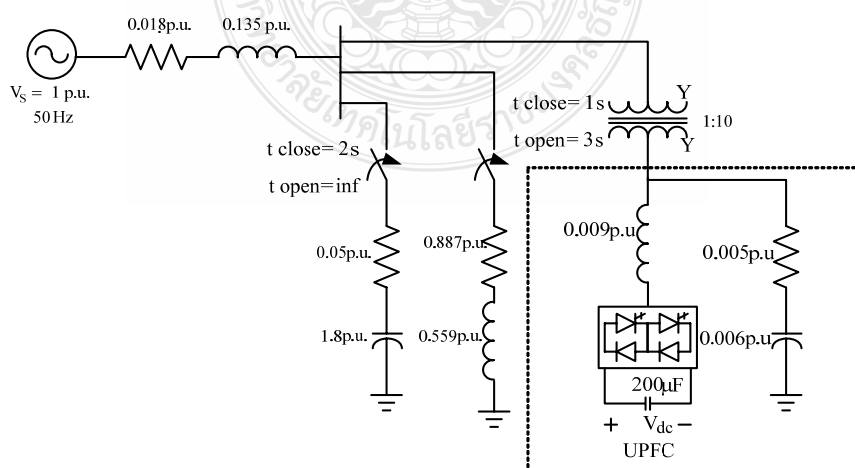
บทที่ 4

ผลการจำลองการทำงาน

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยได้ดำเนินการจำลองการทำงานตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน การจำลองการทำงานตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรม และการจำลองการทำงานตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมทั้งสองส่วนรวมกันเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งได้ดำเนินการจำลองการทำงานดังนี้

4.1 การจำลอง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

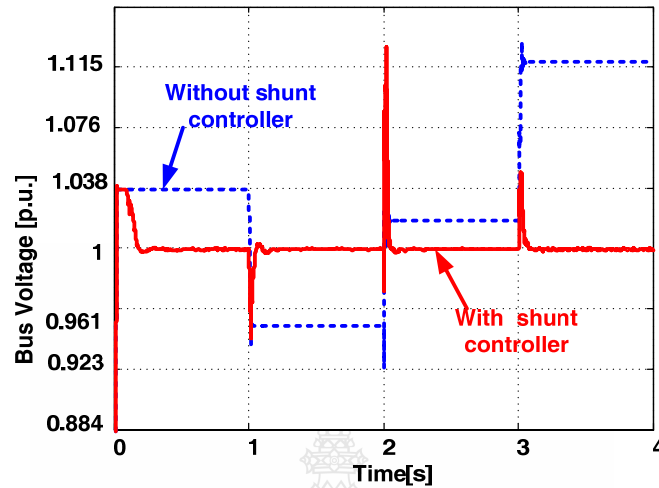
ระบบทดสอบที่นำมาจำลองเพื่อศึกษาการทำงานพื้นฐานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน เป็นระบบที่ประกอบด้วยแหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย และโหลดซึ่งมีสองตัวทำงานที่ในช่วงเวลาที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.1 ในช่วงเริ่มต้นจนถึงวินาทีที่ 1 จะไม่มีการต่อโหลดใด ๆ ทั้งสิ้นจนกระทั่งถึงวินาทีที่ 1 ได้ทำการต่อโหลดตัวที่ 1 ซึ่งเป็นโหลดแบบ RL อนุกรมเข้ากับระบบ ต่อจากนั้นที่เวลาวินาทีที่ 2 ทำการต่อโหลดตัวที่ 2 เป็นโหลดแบบ RC อนุกรมเข้ากับระบบ และเมื่อถึงเวลาวินาทีที่ 3 ได้ทำการปลดโหลดตัวที่ 1 ออกจากระบบ เหตุการณ์การทำงานในลักษณะนี้ส่งผลให้แรงดันที่บัสมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้นำอุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน มาติดตั้งที่บัสเพื่อเป็นอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันที่บัสให้คงที่ที่ค่าพิกัด



รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน

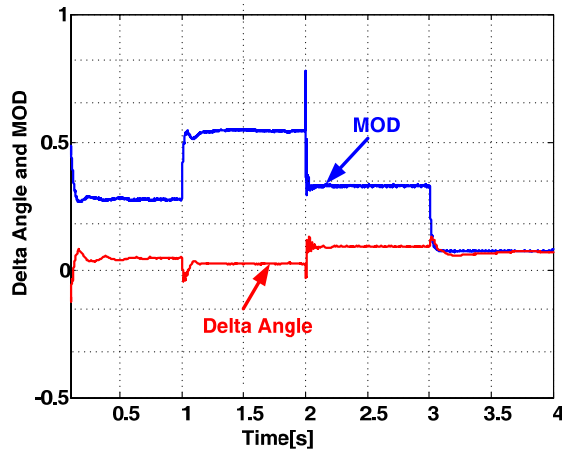
4.1.1 ผลการจำลอง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

การจำลองการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน จะเป็น การทดสอบการนำ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน มาเป็นอุปกรณ์รักษาระดับ แรงดันที่บัสที่เชื่อมต่อ ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้



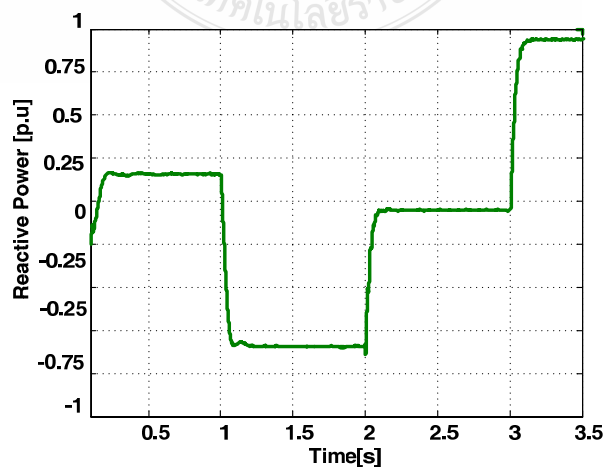
รูปที่ 4.2 แรงดันที่บัสเชื่อมต่อ

จากรูปที่ 4.2 รูปคลื่นที่เป็นเส้นประเป็นแรงดันประสิทธิผล (RMS) ที่บัสในสถานะที่ไม่ได้ ทำติดตั้งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน พบว่าในช่วงเวลาดังแต่เริ่มต้นจนถึง วินาทีที่ 1 แรงดันจะเกินค่าพิกัดหลังจากนั้นเมื่อทำการต่อโหลดแบบ RL เข้ากับระบบในช่วงเวลาวินาที ที่ 1 ส่งผลให้แรงดันที่บัสต่ำกว่าแรงดันพิกัด ในช่วงเวลาวินาทีที่ 2 มีการต่อโหลดแบบ RC เข้ากับระบบ ส่งผลให้แรงดันที่บัสเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังคงต่ำกว่าแรงดันพิกัดเล็กน้อย และช่วงเวลาวินาทีที่ 3 ทำการปลดโหลด ที่ RL ออกจากระบบส่งผลให้เกิดแรงดันเกินค่าพิกัดมาก เมื่อทำการติดตั้ง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า แบบรวมส่วนที่ต่อขนาน เข้ากับระบบจะพบว่าสามารถควบคุมแรงดันที่บัสให้มีค่าใกล้เคียงกับ แรงดันพิกัดได้ดังแสดงในกราฟเส้นทึบ แรงดันที่บัสในขณะที่ติดตั้ง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ รวม ส่วนที่ต่อขนาน สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาประมาณ 100 มิลลิวินาที

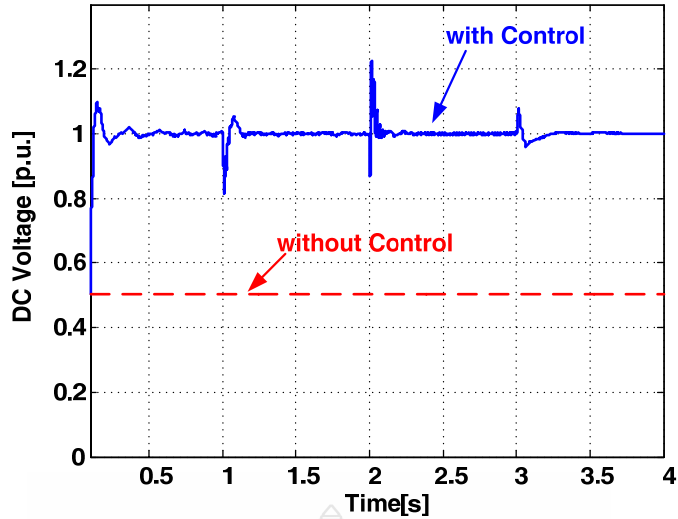


รูปที่ 4.3 ขนาดและมุมเฟสของสัญญาณไซน์อ้างอิง

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงขนาดและมุมเฟสของสัญญาณไซน์อ้างอิง (m_a และ δ) ซึ่งเป็นสัญญาณขาออกของชุดควบคุมแรงดันทั้งสองในแต่ละช่วงการทำงาน จะพบว่าในช่วงที่ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันที่บัส (วินาทีที่ 1 – 2) ขนาดสัญญาณไซน์อ้างอิงจะเพิ่มขึ้นจาก 0.3 ไปเป็น 0.55 การทำงานในช่วงนี้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน จะมีขนาดมากกว่าแรงดันที่บัส ส่งผลให้ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน กำเนิดกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบในช่วงที่ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน ทำหน้าที่ลดแรงดันที่บัส (วินาทีที่ 3–4) ขนาดสัญญาณไซน์อ้างอิงจะลดลงจาก 0.3 ไปเป็น 0.1 การทำงานในช่วงนี้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน จะมีขนาดต่ำกว่าแรงดันที่บัสส่งผลให้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน ดูดกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบ ในขณะที่มุมเฟสของสัญญาณไซน์อ้างอิงจะนำหน้าแรงดันที่บัสมากขึ้นเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่กำลังเพิ่มขึ้นให้มีค่าคงที่ที่ค่าพิกัดดังรูปที่ 4.4

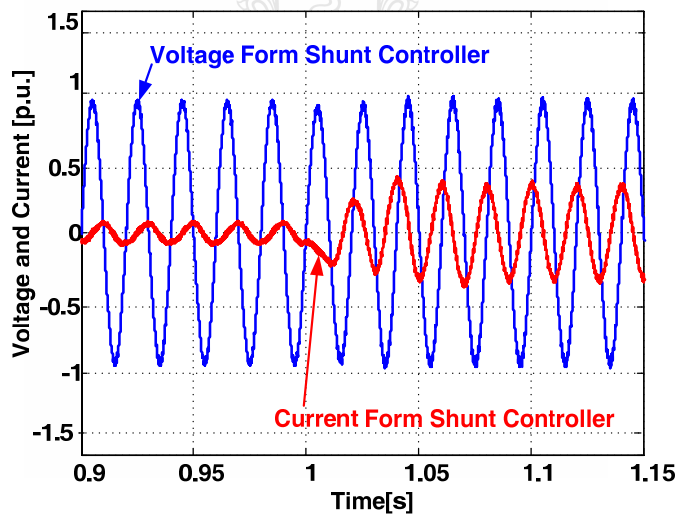


รูปที่ 4.4 กำลังไฟฟ้าเสมือน



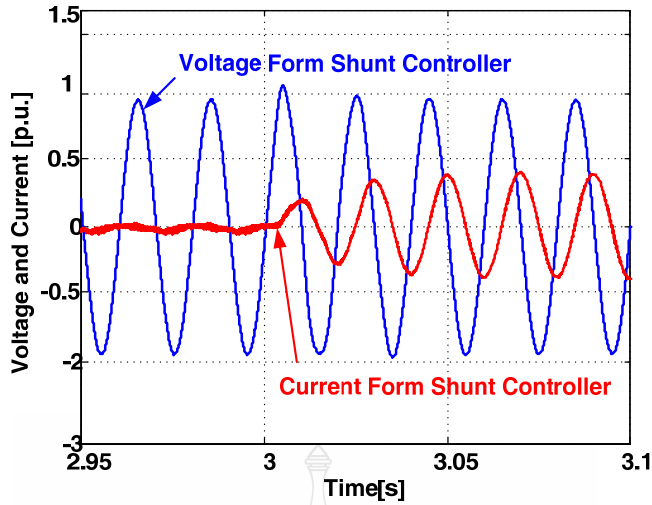
รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 4.5 ในขณะที่มุมเฟสของสัญญาณไซน์อ้างอิงจะล้าหลังแรงดันที่บัสมากขึ้นเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่กำลังลดต่ำลงให้มีค่าคงที่ที่ค่าพิกัด ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมส่วนเส้นประเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการควบคุม



รูปที่ 4.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนานที่เวลา 0.9-1.15 วินาที

จากรูปที่ 4.6 เป็นรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน ในช่วงที่ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน กำหนดและดูดกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงที่ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนานกำหนดกำลังไฟฟ้าเสมือนกระแสจะนำหน้าแรงดัน

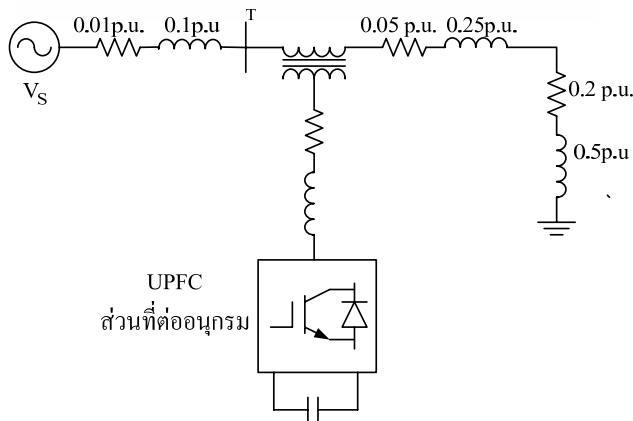


รูปที่ 4.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน
ที่เวลา 2.95-3.1 วินาที

จากรูปที่ 4.7 ช่วงที่ 3.04-3.1 วินาที ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน
ดูดกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนกระแสจะหล้าหลังแรงดัน

4.2 การจำลอง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม

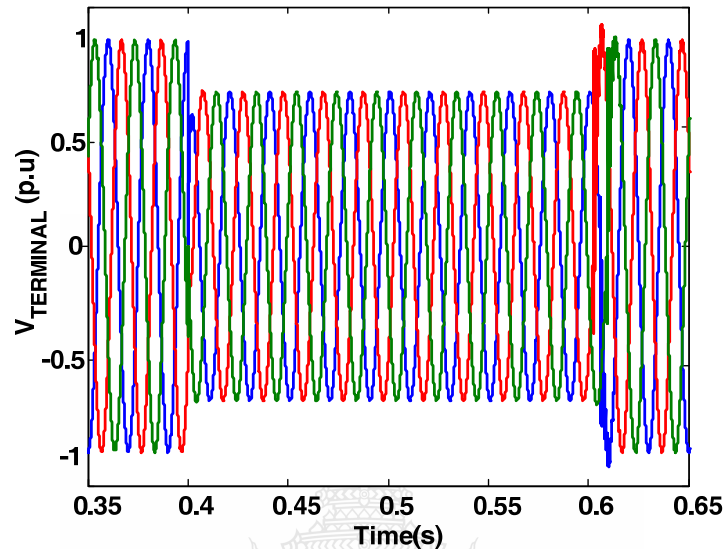
การจำลองนี้เป็นการนำเอาอุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม
มาป้องกันโหลดจากการเกิดแรงดันตกช่วงสั้นแบบ 3 เฟสสมมูล ระบบทดสอบที่นำมาจำลองเป็นระบบ
แบบง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูประบบทดสอบจะมีแหล่งจ่าย จ่ายไฟฟ้าไปยังโหลดโหลดแบบ RL
อนุกรมและเป็นโหลดแบบ 3 เฟสสมมูล ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม
ถูกเชื่อมต่ออนุกรมกับสายป้อนระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันโหลดจากการ
เกิดแรงดันตกช่วงสั้น



รูปที่ 4.8 ระบบทดสอบการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม

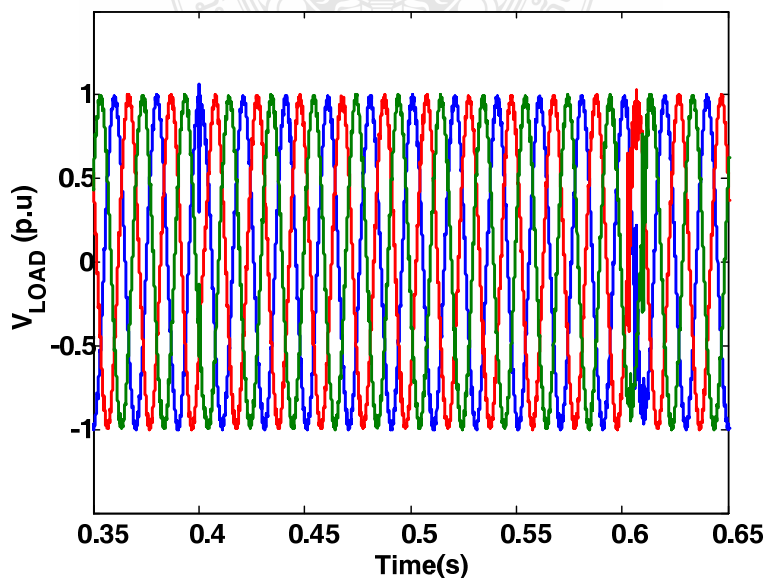
4.2.1 ผลการจำลอง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม

การจำลองการทำงานของอุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม ในบทความนี้มีการจำลองสถานะการทำงาน ในช่วงเวลา 0.4 – 0.6 วินาที เป็นการจำลองในสถานะเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส ส่งผลให้เกิดแรงดันตกช่วงสั้นประมาณ 30% ดังแสดงในรูปที่ 4.9

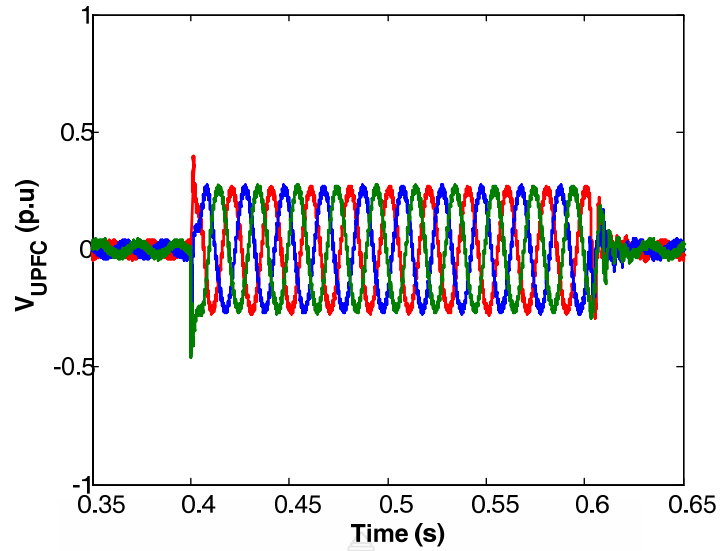


รูปที่ 4.9 แรงดันที่ขั้วที่ต่อแหล่งจ่าย

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม ในสายได้รับการชดเชยจาก ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม ทำให้มีขนาดที่พิกัดดังแสดงในรูปที่ 4.10

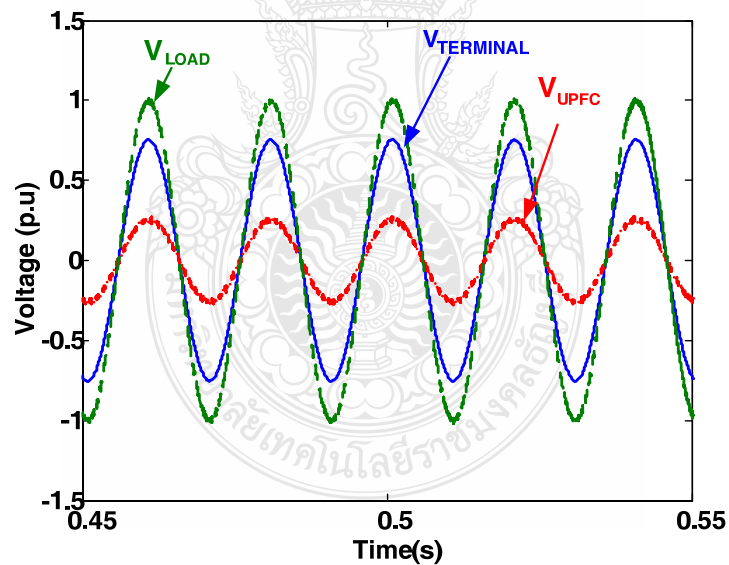


รูปที่ 4.10 แรงดันที่โหลด



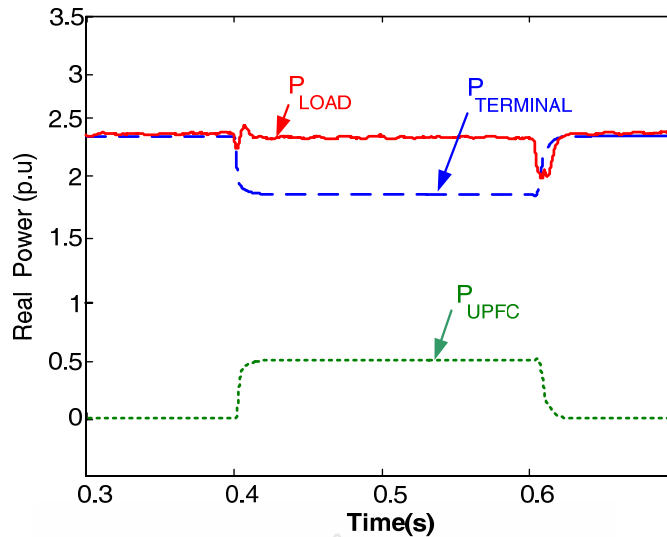
รูปที่ 4.11 แรงดันชดเชยจาก UPFC

จากรูปที่ 4.11 เป็นรูปคลื่นแรงดันที่ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรมผลิตเพื่อชดเชยให้กับระบบ



รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว, แรงดันไฟฟ้าที่โหลด และแรงดันไฟฟ้าชดเชย

จากรูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบของรูปคลื่นแรงดันโหลด แรงดันที่ขั้ว และแรงดันที่ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม ผลิตเพื่อชดเชยให้กับระบบ



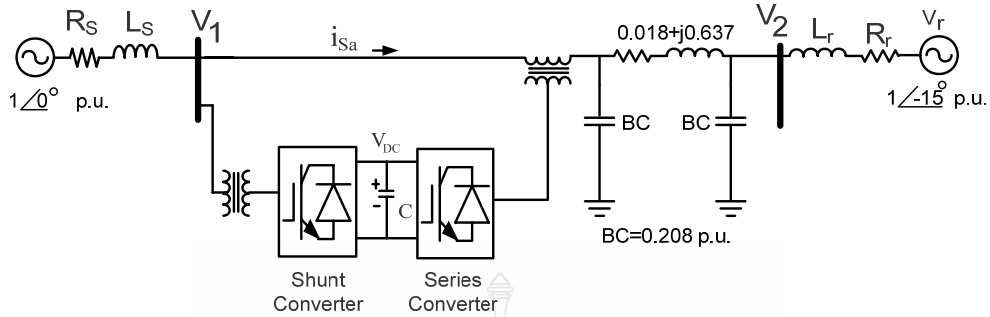
รูปที่ 4.13 กำลังไฟฟ้าจริงที่ขั้ว กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดและกำลังไฟฟ้าจริงของตัวควบคุมแบบอนุกรม

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงกราฟกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ขั้ว ($P_{Terminal}$) ลดลง ในช่วงดังกล่าวอุปกรณ์ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม จะกำเนิดกำลังไฟฟ้าจริง (P_{UPFC}) ชดเชยให้กับโหลด ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด (P_{Load}) มีค่าคงที่

การจำลองส่วนที่ต่ออนุกรมนี้เป็นการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ที่เรียกว่า ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม เพื่อป้องกัน โหลดจากการเกิดแรงดันตกช่วงสั้นทางด้านแหล่งจ่ายแบบ 3 เฟสสมดุล ซึ่งการควบคุมแรงดันที่บัสเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของสัญญาณอ้างอิงและแรงดันที่บัส ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม สามารถรักษาระดับแรงดันที่บัสได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้เนื่องจากโครงสร้างของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม ในการจำลองนี้แรงดันกระแสตรงขาเข้าได้รับจากแหล่งจ่ายกระแสตรง ดังนั้นตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม จึงสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจริงให้กับโหลดได้ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจริงให้กับโหลดได้อย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่เกิน 20 มิลลิวินาที

4.3 การจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

จากการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน และการจำลองการทำงานของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม เมื่อนำมาต่อรวมกันผ่านตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแส ดังรูปที่ 4.14

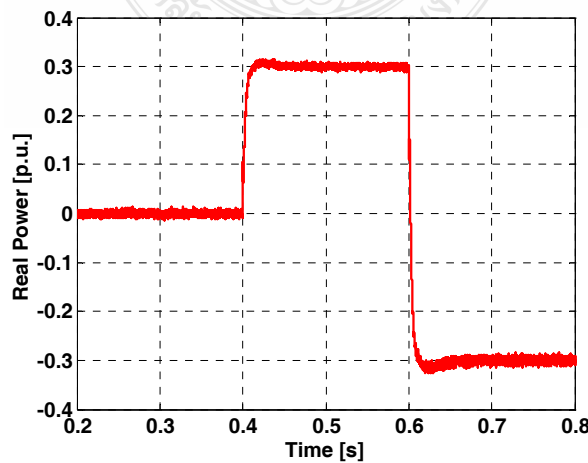


รูปที่ 4.14 วงจรที่ใช้ในการจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

จากรูปที่ 4.14 นำมาจำลองการทำงานบนโปรแกรม ATP/EMTP ในการจำลองการทำงานการควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบรวม โดยการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ จากอีกบัสไปยังอีกบัส โดยกำหนดให้แรงดันที่บัส 1 เท่ากับ $1\angle 0^\circ$ p.u. และแรงดันที่บัส 2 เท่ากับ $1\angle -15^\circ$ p.u. ในการจำลองการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี คือกรณีแรกเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง กรณีที่ 2 เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

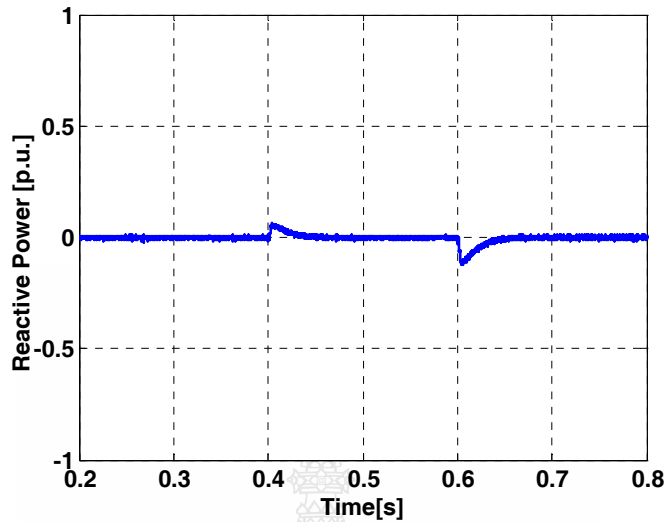
4.3.1 ผลการจำลองการควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง

การจำลองกรณีที่ 1 เป็นควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง และกำหนดให้กำลังไฟฟ้าเสมือนถูกควบคุมให้เป็นศูนย์ ซึ่งผลการจำลองแสดงได้ดังนี้



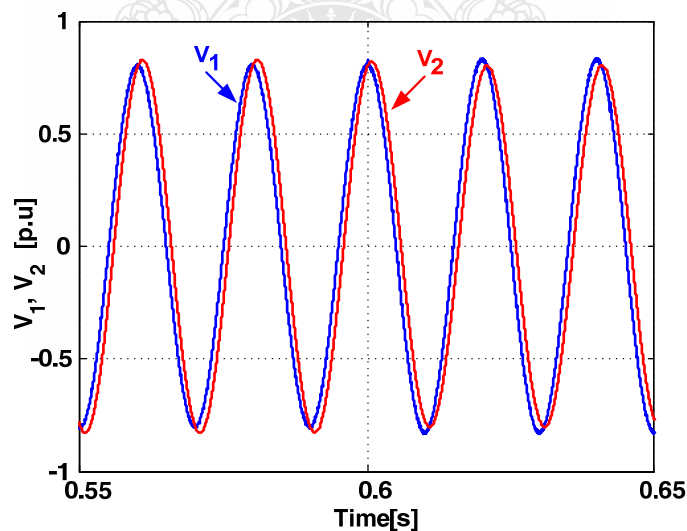
รูปที่ 4.15 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง

จากรูปที่ 4.15 ในช่วงเวลาที่ 0.4 ถึง 0.7 วินาที กำลังไฟฟ้าจริงเป็นบวกโดยมีค่าเท่ากับ 0.3 p.u. เป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งจะไหลจากบัส 2 ไปบัส 1 และในช่วงเวลา 0.6 ถึง 1 วินาที กำลังไฟฟ้าจริงเป็นลบมีค่าเท่ากับ -0.3 p.u. ซึ่งการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากบัส 1 กลับมายังบัส 2



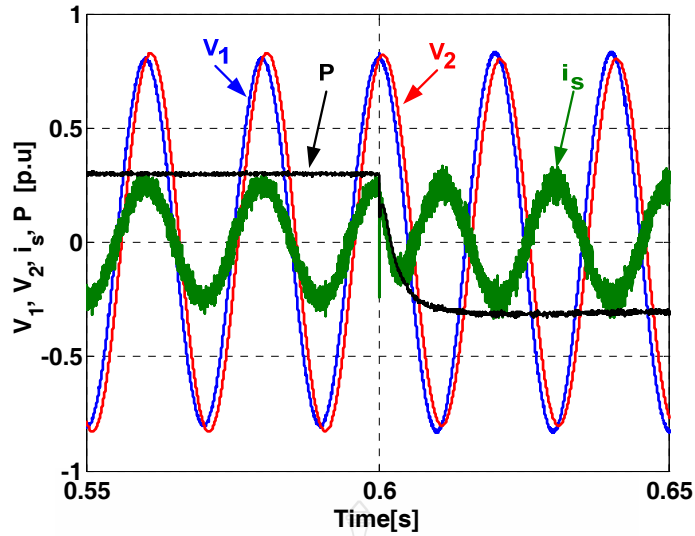
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าเสมือน

จากรูปที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกควบคุมให้คงที่ให้เป็นศูนย์ได้ ในขณะที่กำลังควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง



รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2

จากรูปที่ 4.17 ซึ่งในช่วงเวลาที่ 0.4 - 0.6 วินาที ที่กำลังไฟฟ้าจริงไหลจากบัส 1 ไปบัส 2 แรงดันไฟฟ้า V_2 จะมีขนาดมากกว่าแรงดัน V_1 ส่วนในช่วงเวลาที่ 0.6 - 1 วินาที ที่กำลังไฟฟ้าจริงไหลจากบัส 1 ไปบัส 2 แรงดัน V_1 จะมีขนาดมากกว่าแรงดัน V_2

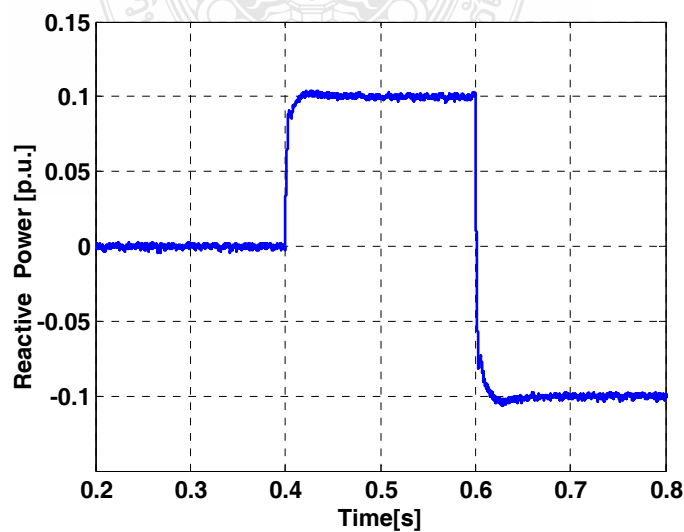


รูปที่ 4.18 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2 เปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลในสาย

จากรูปที่ 4.18 ในช่วงเวลาที่ 0.4 - 0.6 วินาที เป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงไหลจากบัส 2 มาบัส 1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายจะมีเฟสตรงกันกับแรงดัน และในช่วงเวลาที่ 0.6 - 1 วินาที เป็นการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าจริงจากบัส 1 ไปยังบัส 2 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายมีเฟสเป็นตรงกันข้ามกับแรงดัน

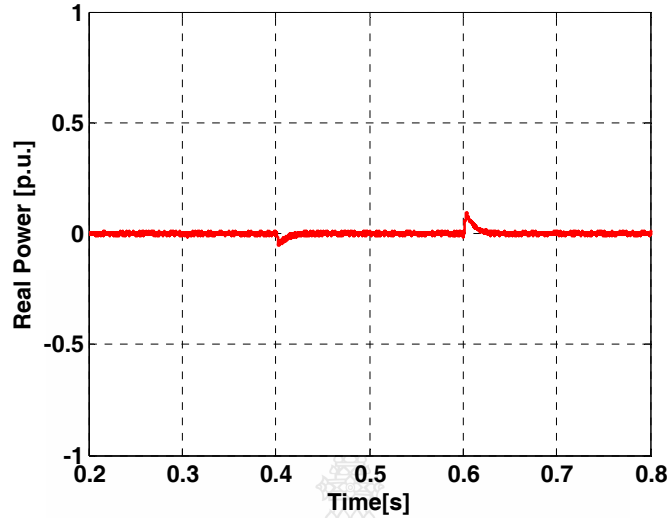
4.3.2 ผลการจำลองการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน

การจำลองกรณีที่ 2 เป็นควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน และกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงถูกควบคุมให้เป็นศูนย์ ซึ่งผลการจำลองแสดงได้ดังนี้



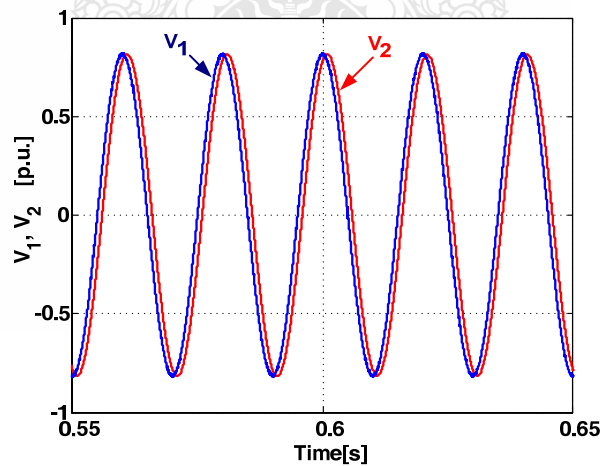
รูปที่ 4.19 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน

จากรูปที่ 4.19 ในช่วงเวลาที่ 0.4 ถึง 0.7 วินาที กำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นบวก เป็นการจำลองการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยกำลังไฟฟ้าเสมือน จะไหลจากบัส 2 ไปบัส 1 และในช่วงเวลา 0.7 ถึง 0.8 วินาทีกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นลบ เป็นการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน จากบัส 1 กลับมายังบัส 2



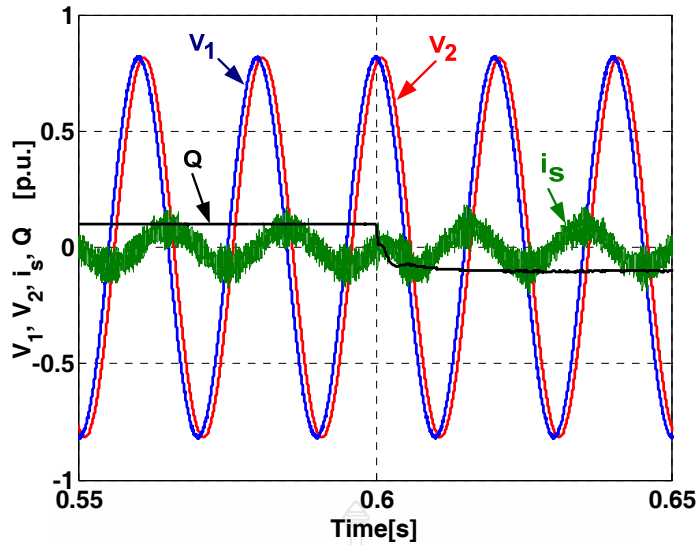
รูปที่ 4.20 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริง

จากรูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกควบคุมให้คงที่ให้เป็นศูนย์ได้ ในขณะที่กำลังควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน



รูปที่ 4.21 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 แรงดันไฟฟ้า 2

จากรูปที่ 4.21 ในการจำลองในช่วงเวลาที่ 0.4 – 0.6 วินาที กำลังไฟฟ้าเสมือนไหลจากบัส 2 ไปบัส 1 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 มีค่ามากกว่าและมีมุมหน้าหน้าแรงดันที่บัส 1 และผลการจำลองในช่วงเวลาที่ 0.6 – 0.9 วินาที กำลังไฟฟ้าเสมือนไหลจากบัส 1 ไปบัส 2 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่ามากกว่าแรงดันที่บัส 2

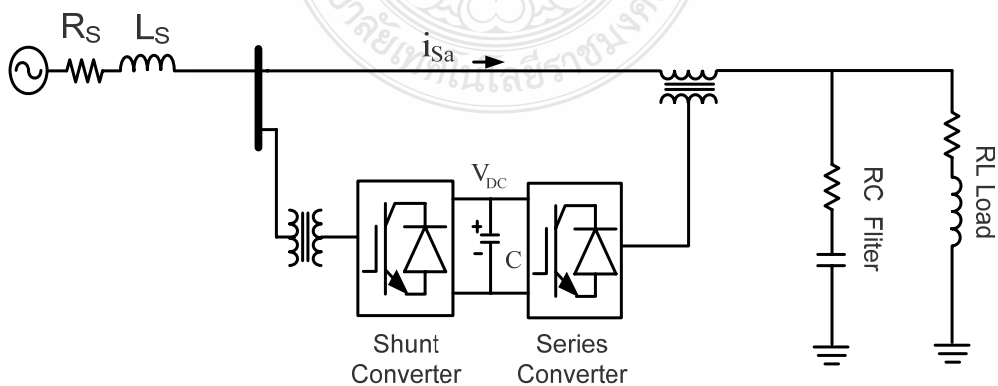


รูปที่ 4.22 แรงดันและกระแสที่บัส 1 และบัส 2 เปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลในสายส่ง

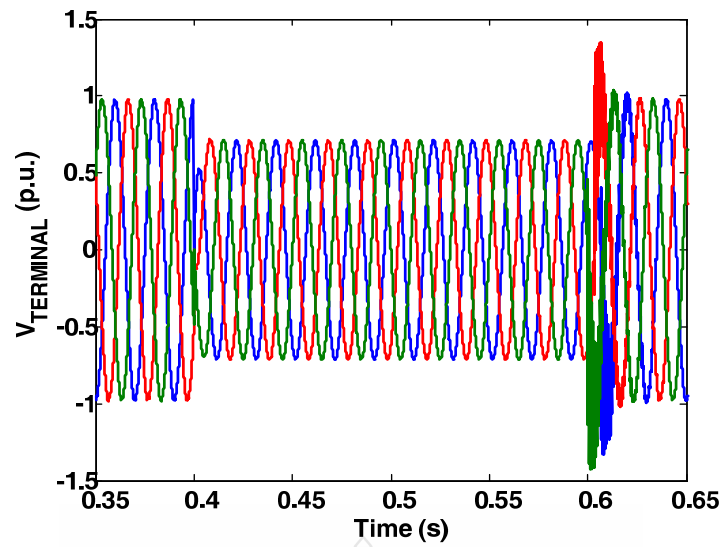
จากรูปที่ 4.22 ในช่วงเวลาที่ 0.4 ถึง 0.6 วินาที เป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือนไหลจากบัส 2 มาบัส 1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายจะมีมุมล้าหลังแรงดัน V_1 และ V_2 ในทางตรงกันข้ามกันช่วงเวลาที่ 0.6 ถึง 1 วินาที เป็นการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าเสมือนจากบัส 1 ไปยังบัส 2 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายจะมีมุมนำหน้าแรงดัน V_1 และ V_2

4.4 การจำลองการชดเชยแรงดัน

จากรูปที่ 4.23 เป็นระบบแบบง่ายโดยมีแหล่งจ่ายเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดโดยมีตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ต่อร่วมกับระบบระหว่างบัสที่มีแหล่งจ่ายกับโหลด เพื่อชดเชยแรงดันที่โหลด เมื่อแรงดันตกช่วงสั้นๆ

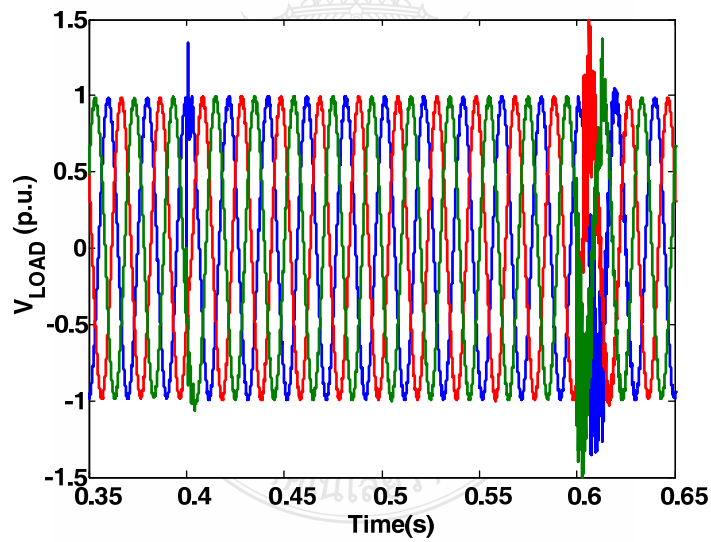


รูปที่ 4.23 ระบบที่ใช้ในการจำลองการชดเชยแรงดันที่โหลดด้วยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



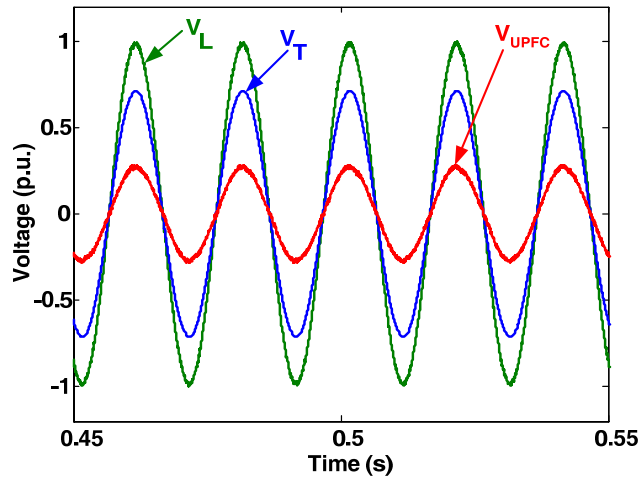
รูปที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ต่อกับแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 4.24 เป็นผลการจำลองเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่แหล่งจ่ายในช่วงเวลาที่ 0.4 – 0.6 วินาที ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด



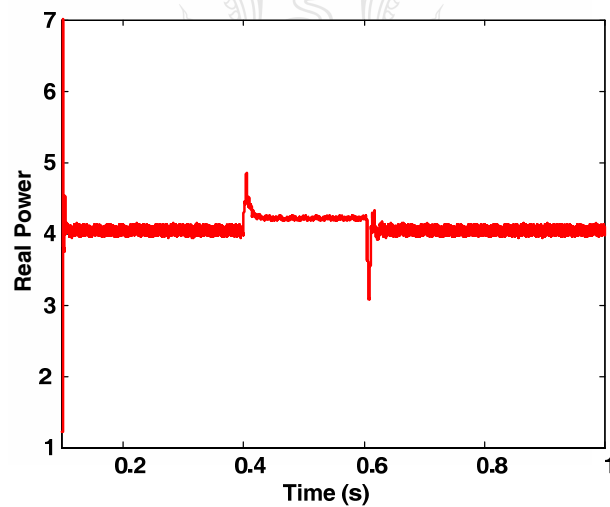
รูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าที่โหลด

จากรูปที่ 4.25 เมื่อควบคุมให้ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ทำให้ชดเชยแรงดันที่โหลดได้



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.26 เป็นผลการจำลองที่เปรียบเทียบกันระหว่างแรงดันในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะของแรงดันที่ขั้วกับแรงดันที่โหลดที่ได้รับการชดเชยแล้ว และแรงดันที่ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมจ่ายให้เพื่อทำการชดเชย และรูปที่ 4.27 แสดงรูปคลื่นของกำลังไฟฟ้าจริงที่ควบคุมให้คงที่เพื่อจ่ายให้กับโหลด



รูปที่ 4.27 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริง

4.5 สรุปผลการจำลอง

การทำงานเชิงพลวัตของตัวควบคุมการไหลกำลังแบบรวม โดยการทำหน้าที่ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยจำลองบนโปรแกรม ATP/EMTP ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ในช่วงระยะเวลา 0.4 ถึง 0.6 วินาที เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงในช่วงเวลาที่ 0.6 ถึง 1 วินาที เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามลำดับ ซึ่งจะเห็นถึงสมรรถนะของการทำงานที่ดีในการควบคุม ทั้งการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ด้วยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในส่วนที่ต่อขนาน และการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมโดย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ในส่วนที่ต่ออนุกรม ซึ่งผลการจำลองสามารถควบคุมการทิศทางการไหลให้สามารถไหลจากบัส 1 ไปยังบัส 2 และสามารถควบคุมให้ไหลกลับจากบัส 2 ไปยังบัส 1 ได้ ซึ่งสามารถตอบสนองเวลาการควบคุมได้อย่างรวดเร็ว โดยกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถควบคุมเป็นอิสระต่อกัน



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาถึงการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ เพื่อช่วยให้เพิ่มขีดความสามารถของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีอยู่เพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้า จึงได้นำตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม มาทดสอบกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 230 kV โดยทดสอบการทำงานในสถานะชั่วคราวด้วยการจำลองบนโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งอภิปรายไว้ดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 ผลการศึกษาการทำงานของคุณสมบัติการไหลของกำลังไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้แบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ ตัวควบคุมแบบอนุกรม เช่น TCSC, SSSC ตัวควบคุมแบบขนาน เช่น SVC, STATCOM และตัวควบคุมแบบผสม เช่น UPFC, IPFC, HVDC ซึ่งในการควบคุมแต่ละวิธีการจะมีความสำคัญที่แตกต่างกันไป สำหรับในงานวิจัยนี้มุ่งประเด็นที่หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นวิธีการของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม จึงถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ สำหรับส่วนประกอบหลักของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม มีหลักการทำงานพื้นฐานดังนี้ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนานทำหน้าที่จ่ายและดูดคลื่นกำลังไฟฟ้าจริงจากอุปกรณ์เชื่อมโยงกระแสตรงและส่งกำลังไฟฟ้าจริงกลับไปยังระบบไฟฟ้ากระแสสลับกระแสสลับที่บัสเชื่อมต่อ อีกส่วนหนึ่งตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรมสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับในอุดมคติที่มีความสามารถในการจ่ายหรือดูดคลื่นได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในการทำงานนั้น ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรมจะทำงานเป็นหน้าที่หลัก โดยการแทรกแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและมุมเฟสเข้ากับสายส่งผ่านทางหม้อแปลงอนุกรมซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่แทรกเข้าไปนี้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ที่สำคัญกระแสไฟฟ้าของสายส่งที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้านี้จะส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้นี้กับระบบไฟฟ้า โดยที่กำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกกำเนิดขึ้นภายในวงจรแปลงผัน ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงที่แลกเปลี่ยนกับระบบไฟฟ้าจะถูกแปลงผันมาจากกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่จุดเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนการทำงานของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน จะทำหน้าที่จ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบเชื่อมโยงกระแสตรง ตามความต้องการของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรมเพื่อสนับสนุนการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรม โดยความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงนี้จะได้จากจุดเชื่อมโยงกระแสตรงถูกแปลงผันกลับไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้วย ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนานผ่านทางหม้อแปลงขนาน นอกเหนือจากนี้แล้ว ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนานยังสามารถดูดหรือกลืนกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควบคุมได้ตามต้องการ ด้วยเหตุผลนี้จึงสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับได้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่แลกเปลี่ยนกันระหว่าง ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมทั้ง 2 ส่วน กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

ส่วนการควบคุมของตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ได้ใช้การควบคุมโดยการแปลงแกนทางเวกเตอร์ นั่นคือตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสเพื่อทำการแปลงแกนเวกเตอร์จาก 3 เฟส ให้เป็นแกนนิ่ง ซึ่งเวกเตอร์อยู่บนแกนของ $\alpha\beta$ แล้วจึงแปลงให้บนองศาประกอบของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามหลักการของทฤษฎีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนบัคคูล แล้วนำค่าของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนนี้เข้าสู่ควบคุมเพื่อควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่ออนุกรม ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในส่วนที่ต่อขนาน จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ซึ่งจากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถควบคุมให้เป็นค่าบวกหรือลบได้แบบทันทีทันใด โดยตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมจะควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสใดบัสหนึ่งมากกว่าบัสอีกบัสหนึ่ง บัสที่มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าจะไหลไปยังบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า และจะเห็นได้จากมุมของกระแสไฟฟ้าในสายจะถูกควบคุมให้นำหน้าหรือล่าหลังแรงดัน

5.1.2 ผลการศึกษาการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ โดยการนำชุดชดเชยแรงดันไฟฟ้าต่อขนานเข้ากับระบบจำหน่าย

จากการนำชุดควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ที่ได้ทำการออกแบบไปทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ 3 เฟส โดยการจำลองการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองกรณีทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 3 เฟส แบบสมมาตร สรุปการชดเชยแรงดันพบว่าตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า สามารถเริ่มการชดเชยแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบได้ในเวลาเริ่มเกิดความผิดปกติโดยใช้เวลา 0.005 วินาที และหลังการเกิดความผิดปกติ เป็นเวลา 0.025 วินาที แรงดันไฟฟ้าจึงเข้าสู่ภาวะปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ห้ออกแบบตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าตกในสถานะสมมาตรของระบบไฟฟ้าด้วยการจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส โดยกำลังจริงอ้างอิงและกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกำหนดให้คงที่ ดังนั้นเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกัน ดังนั้นควรออกแบบระบบควบคุมแบบที่สามารถปรับตัวได้ตามค่าพารามิเตอร์ของระบบ (Adaptive Controller) อีกทั้งยังไม่ได้พิจารณาถึงผลการทำงานที่อาจส่งผลในการออกแบบตัวอุปกรณ์ที่นำไปใช้งานเชิงปฏิบัติได้ เช่นการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การเกิดค่าฮาร์มอนิกส์ เกิดค่าการสูญเสียหรืออื่นๆ ดังนั้นจึงควรมีการวิจัยในส่วนงานนี้ต่อไป

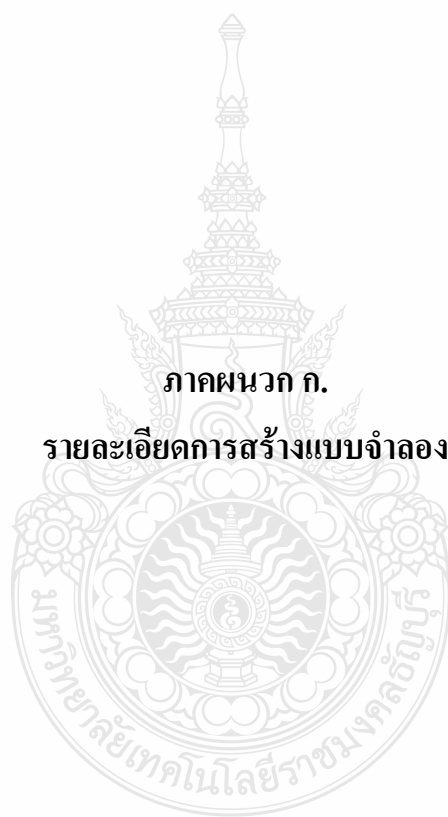


เอกสารอ้างอิง

- [1] รัชต์ชัย กุลวรวานิชพงษ์, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, เอกสารประกอบการสอนสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสุรนารี, 130-139.
- [2] Acha, E., et al., **FACTS : modelling and simulation in power networks**. Chichester : J. Wiley, 2004, pp. 1-403.
- [3] L. Gygyi , “The Unified Power Flow Controller A New Approach To Power Transmission Control” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, **April** 1995. pp 1085-1097
- [4] Sanbao Zheng and Yoke Lin Tan, “Dynamic Characteristic Study Of UPFC Based On A Detailed Simulation Model” pp.1360-1364
- [5] N .Tambe and Prof M L Kothari, “Unified Power Flow Controller (UPFC) Based Damping Controllers for Damping Low Frequency Oscillations in a Power System” , **IE(I) Journal-EL** November 1, 2002. *Vol 84, June 2003*.pp 35-41
- [6] Samina Elyas Mubeen, “Power Flow Control with UPFC in Power Transmission System” World Academy of Science, Engineering and Technology 47 2008, pp.338-342
- [5] Hasanovic, A. **Modelling and Control of the Unified Power Flow Controller (UPFC)**, Master of Science in Electrical Engineering Thesis, Department of Computer Science and Electrical Engineering, West Virginia university, 2000.
- [6] Song, Y. H., and Johns, A. T., **Flexible ac transmission system (FACT)**. London: The Institution of Electrical Engineering, 1999, pp. 1-592.
- [7] Hingorani, N.G., **Understanding FACTS**. IEEE Power Engineering society, 2000, pp.135-160.
- [8] F. Frohr and F.Orttenbuger, **Introduction to electronics control engineering**. Berlin and Munich: Seimens AG, 1982
- [9] ชาญนรงค์ สอนดิษฐ์, “ปัญหาไฟฟ้าขัดข้อง,” **คุณภาพไฟฟ้า**, เล่มที่ 23, 2550. หน้า 6-11.
- [10] ยงยุทธ จิตรพยัคฆ์, “สาเหตุที่อุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ทำงานเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ,” **คุณภาพไฟฟ้า**, เล่มที่ 21, 2550. หน้า 4-5.
- [11] Bergen, A.R. and Vittal, V., **Power Systems Analysis**. Prentice_hall Inc , 2000, pp.90-100.
- [12] Ghosh, A. and Ledwich, G., **Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices**. Kluwer Academic Publishers, 2002, pp.27-53.
- [13] IEEE Standards Board., “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality” **IEEE Standards**, IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality :IEEE Std 1159-1995, Approved June 14, 1995.

- [14] Gosbell V.J., "Voltage Unbalance", **Power Quality Centry**, Technical Note No. 6, October, 2002.
- [15] Singh, B., Haddad, K.A., and Chandra, A., "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement," **Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 46, No. 5, October 1999. pp 960-971.
- [16] Lamoree et al., "Voltage Sag Analysis Case Studies" **IEEE Transactions on Industry Application**, Vol. 30, No. 4, July / August 1994, pp 1083-1089.
- [17] Hochgraf, C. and Lasseter, R.H., "Statcom Controls for Operation with Unbalanced voltages," **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol.13, no.2, April 1998. pp.538-544.
- [18] Manmek, T., **Real-Time Power System Disturbance Identification and its Mitigation using an Enhanced Least Squares Algorithm**, Ph. D. Thesis, Electrical Engineering and Telecommunications, New South Wales University, 2006.
- [19] Nasiraghdam, H. and Jalilian, A., "Balanced and Unbalanced Voltage Sag Mitigation Using DSTATCOM with Linear and Nonlinear Loads," **International Journal Of Electrical, Computer, and Systems Engineering**, Vol.1, No. 2, 2007. pp 88-91.
- [20] กิตติวัฒน์ เชื้อยงนิน, การลดความยุ่งยากของอัลกอริทึมการควบคุมสำหรับตัวชดเชยแรงดันตกชั่วขณะจากมุมมองเชิงปฏิบัติ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [21] Vilathgamuwa, M., Perera, R. and Choi, S. S. "Performance Improvement of the Dynamic Voltage Restorer With Closed-Loop Load Voltage and Current-Mode Control," **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 17, No. 5, September 2002. pp 824-834.
- [22] ประจวบ บุญศรีรัมย์, วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนาดสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอพที และการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [23] Wahab, N.I., "Response of D-STATCOM Under Unbalanced Voltage Condition Caused By SLG Fault" **IEEE Scored.**, 2003, Putrajaya Malaysia., 2003. pp 395-400.
- [24] Kalyan, k.Sen., "STATCOM- STATic Synchro Compensator : Theory, Modeling and Application," **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1998. pp 117-1183.
- [25] ศุภมาส ศิริกุล และ ไชยะ แซ่มซ้อย, "การจำแนกพัฒนาการของฟลัดต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 29, 9-10 พฤศจิกายน 2549, ณ. โรงแรมแอมบาสซเดอร์ซีดี จอมเทียน จ.ชลบุรี, 2549. หน้า 449.

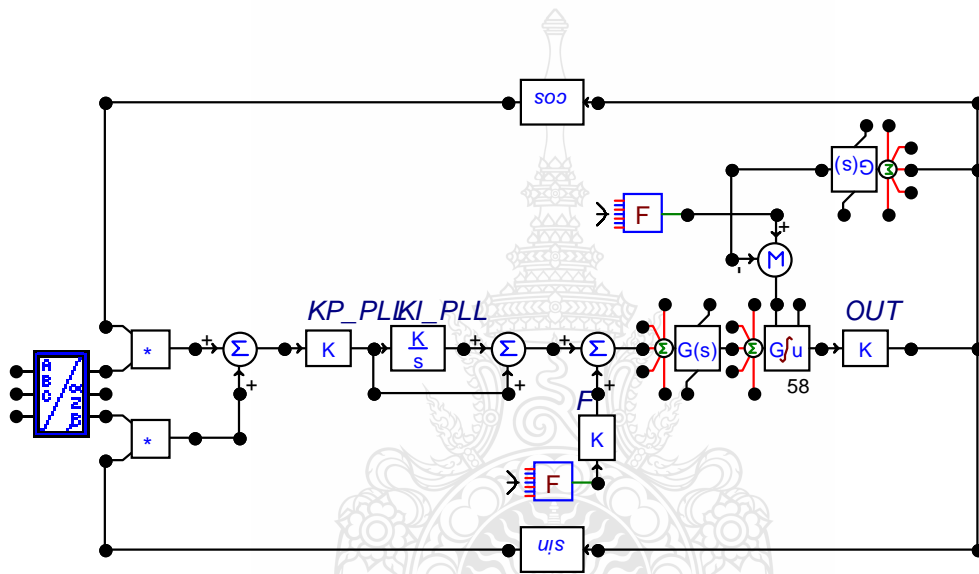
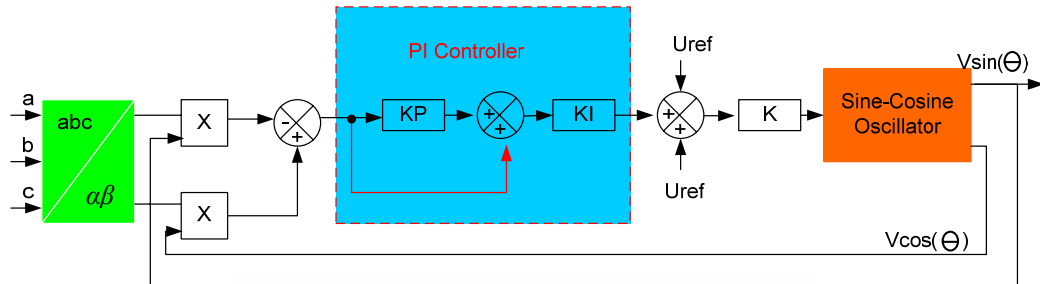
- [26] Haque, M.H., "Compensation of Distribution System Sag By DVR and D-STATCOM," **IEEE Porto Power Tech**, 10-13 September 2001, Porto Portugal., 2001.
- [27] Lehn, P.W. and Iravani, M.R., "Experimental Evaluation of STATCOM Closed Loop Dynamics," **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 13, No. 4, October 1998 .pp1378-1384.
- [28] Wang, G., Zhang, M. and Jiang, C., "Optimization of Controller Parameters Based on The Improved Genetic Algorithms, " **Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation**, June 21 - 23, 2006, Dalian, China. pp 3695-3698.
- [29] Rao et al., "STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications," **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol.15, No.4, October 2000. pp 1311-1317.
- [30] ขงยุทธ จิตรพยัคฆ์, " การคำนวณแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล, " **คุณภาพไฟฟ้า**, เล่มที่ 22, 2550. หน้า 4-5.
- [31] Manmek et al., "Voltage Dip Detection Based on an Efficient Least Squares Algorithm for D-STATCOM Application , " **IPEMC**, 2006.
- [32] Sedraoui, K., Fnaiech, F. and Al-Haddad, K. "Application of the Instantaneous Power With the symmetrical components theory to Control Unbalanced and Non-Sinusoidal Three Phase Power System," **IEEE Transactions on Power Delivery**
- [33] Akagi, H., Watanabe, E. H. and Aredes, M. "Instantaneous power theory and applications to power conditioning," **IEEE PRESS**, A John wiley & sons, 379p.
- [34] วารุณี ศรีสงคราม, วันชัย ทรัพย์สิงห์ และไพศาล บุญเจียม, " การเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่ไม่สมมาตร เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า, " **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า**, ครั้งที่ 29, 9-10 พฤศจิกายน 2549, ณ. โรงแรมแอมบาสเซอร์ ซิตี้ จอมเทียน จ.ชลบุรี, 2549. หน้า 193.
- [35] Boonchiam, P., and Mithulananthan, N., "Understanding of Dynamic Voltage Restorers Through MATLAB Simulation," **Thammasat Int. J. Sc. Tech.**, Vol. 11, No. 3, July-September 2006.



ภาคผนวก ก.

รายละเอียดการสร้างแบบจำลอง

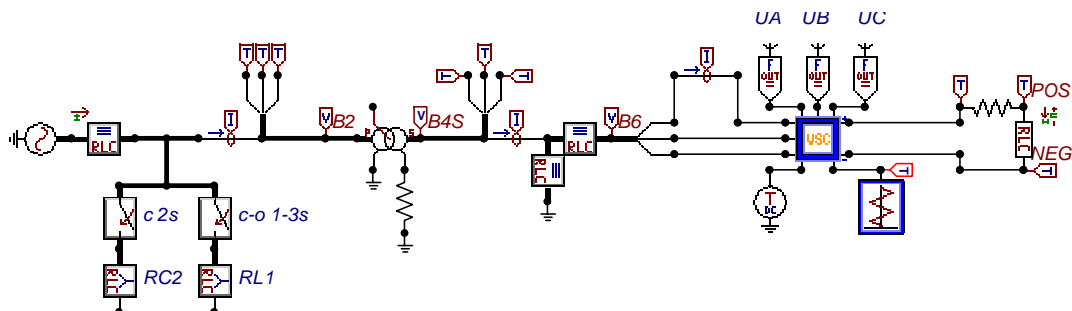
1. ชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ ก.1 แบบจำลอง Phase Lock Loop

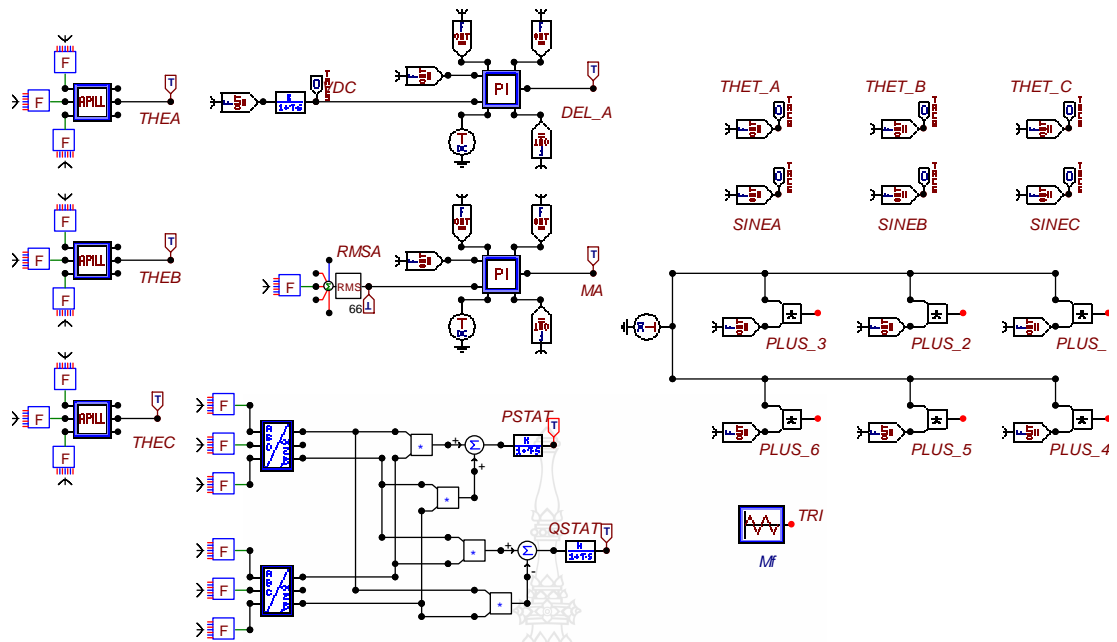
2. แบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าส่วนที่ต่อขนาน (ตามหัวข้อที่ 4.1)

2.1 แบบจำลองของวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม



รูปที่ ก.2 แบบจำลองวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน

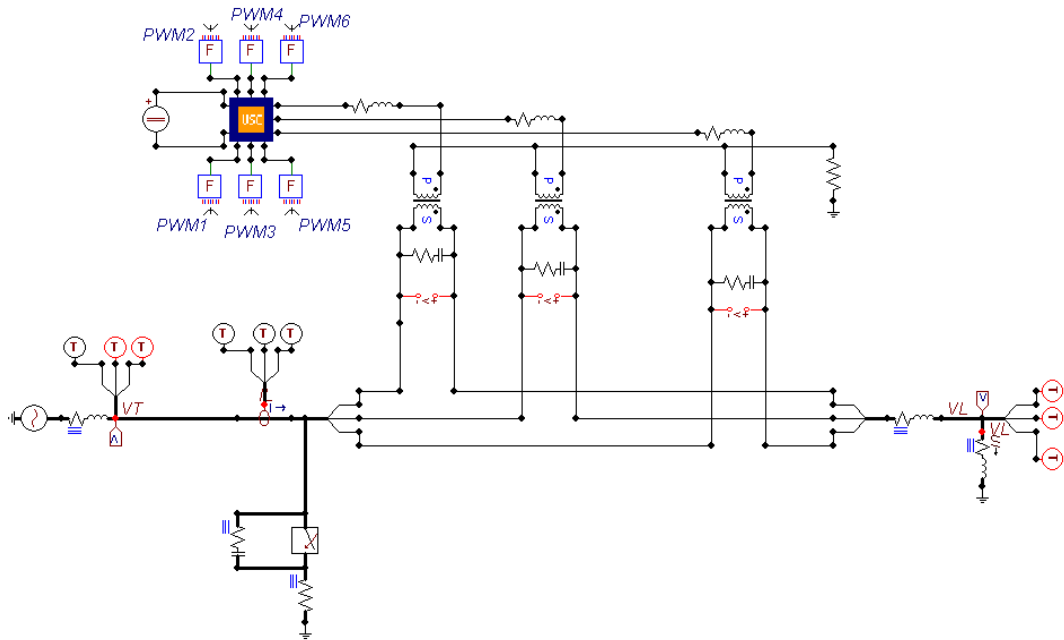
2.2 แบบจำลองของระบบควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่อขนาน



รูปที่ ก.3 ระบบควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่อขนาน

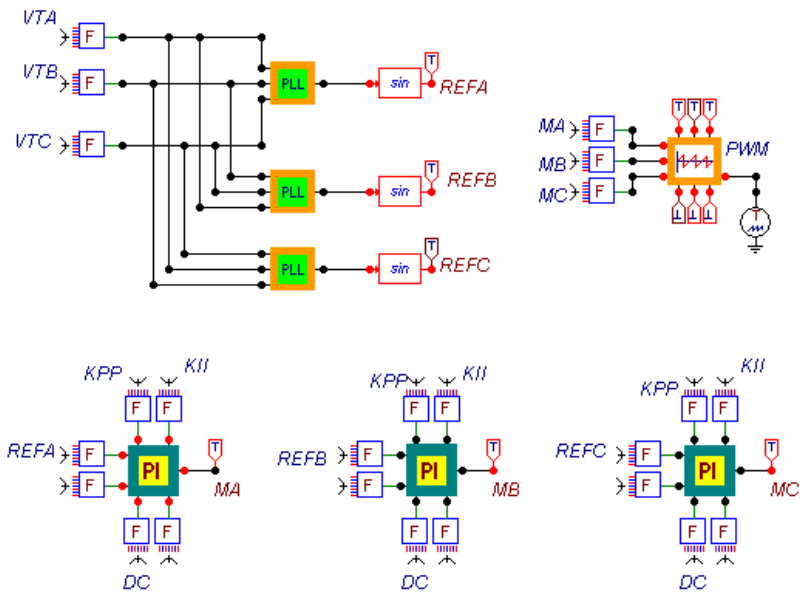
3. แบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าส่วนที่ต่อขนาน (ตามหัวข้อ 4.2)

3.1 แบบจำลองของวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม



รูปที่ ก.4 แบบจำลองวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม

3.2 แบบจำลองของระบบควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมส่วนที่ต่ออนุกรม

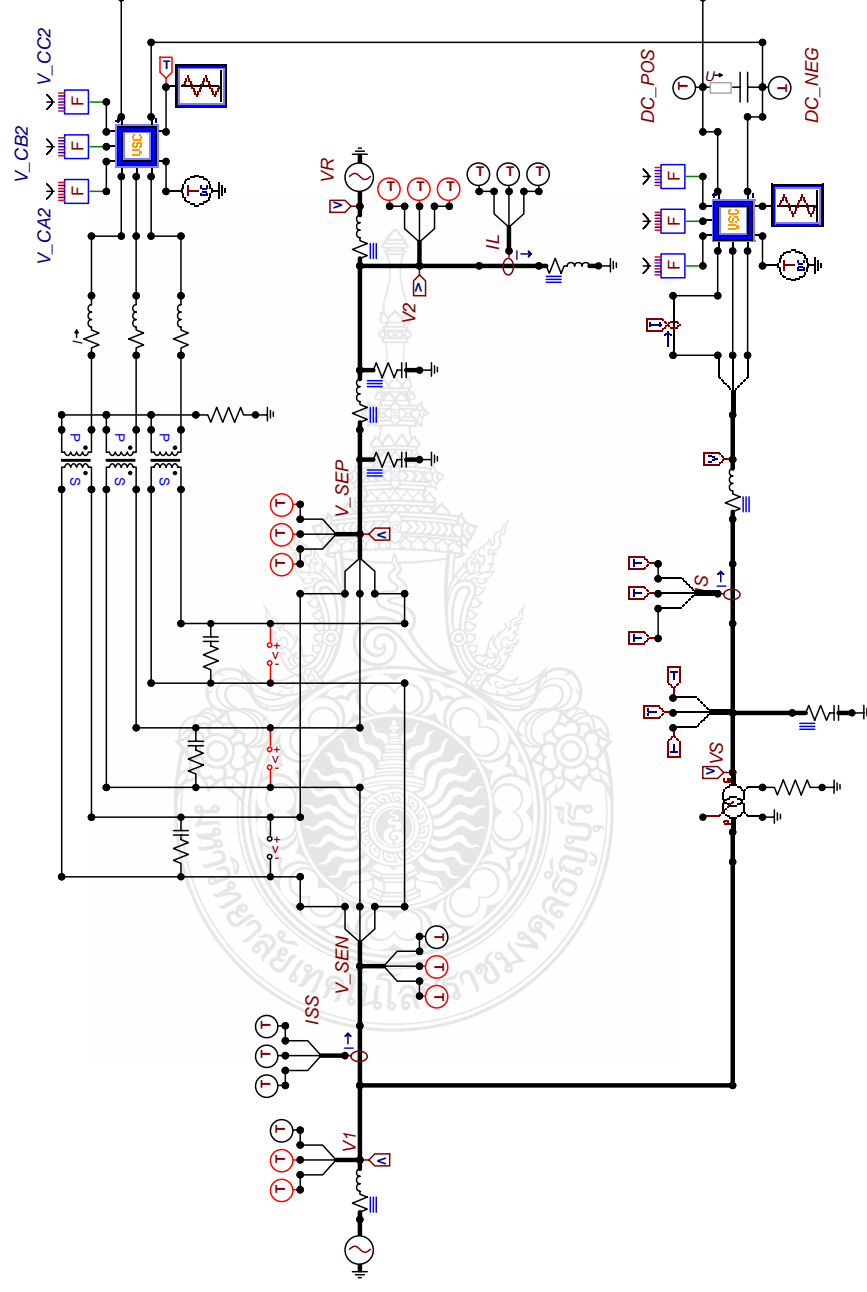


รูปที่ ก.5. ระบบควบคุมของ ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม ส่วนที่ต่ออนุกรม



4. แบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (ตามหัวข้อ 4.3)

4.1 แบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

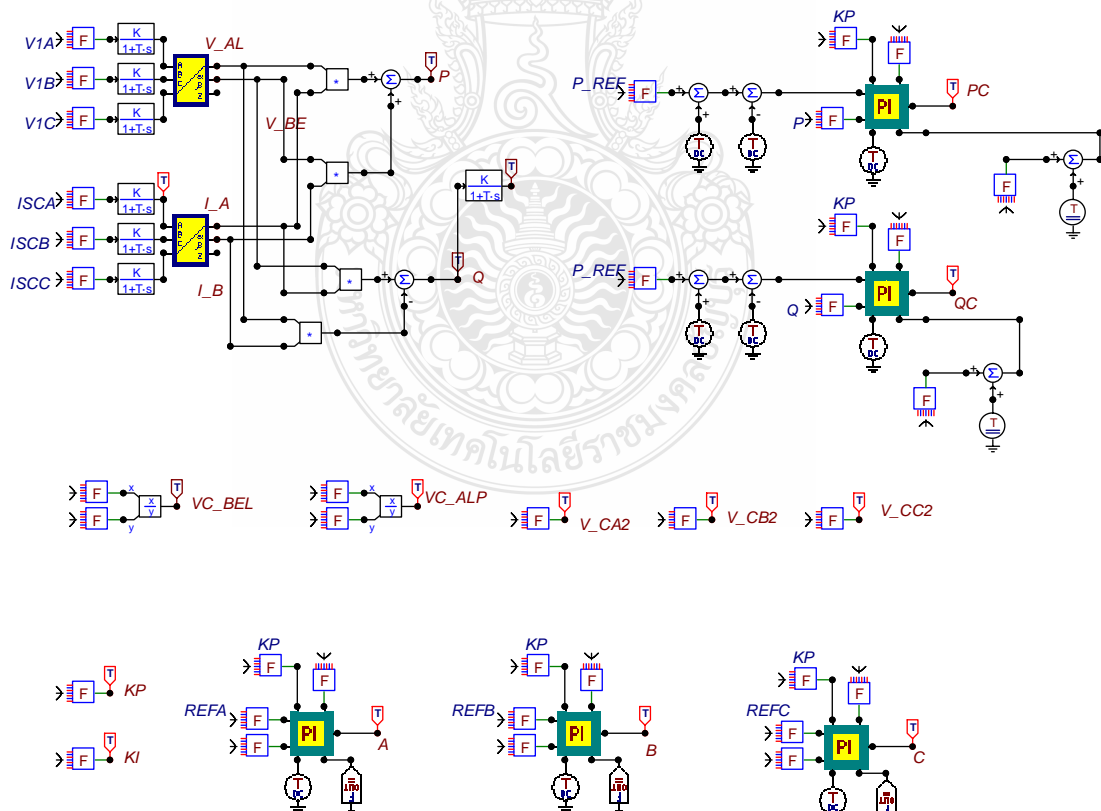


รูปที่ ก.6 แบบจำลองวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมระบบที่ใช้ในการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ของระบบในการจำลองการทำงาน

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
แรงดันของแหล่งจ่าย	$V_1 = 1 \angle 0^\circ \text{ p.u. } V_2 = 1 \angle -15^\circ \text{ p.u. } 50 \text{ Hz}$
ความถี่การสวิตซ์ของคอนเวอร์เตอร์	5 kHz
ตัวเชื่อมต่อโยไฟฟ้ากระแสตรง	300 μF
แรงดัน DC อ้างอิงไฟฟ้า	$V_{\text{DC_REF}} = 0.8 \text{ p.u.}$
ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ	$L_C = 0.1, R_C = 0.0001 \ \Omega$
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง	$R=0.18 \text{ p.u. } L=0.637 \text{ p.u. } BC = 0.208 \text{ p.u.}$
ตัวควบคุม PI ของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง	$K_P = 0.3179, K_I = 161.29$
ตัวควบคุม PI ของชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน	$K_P = 0.96129, K_I = 67.114$

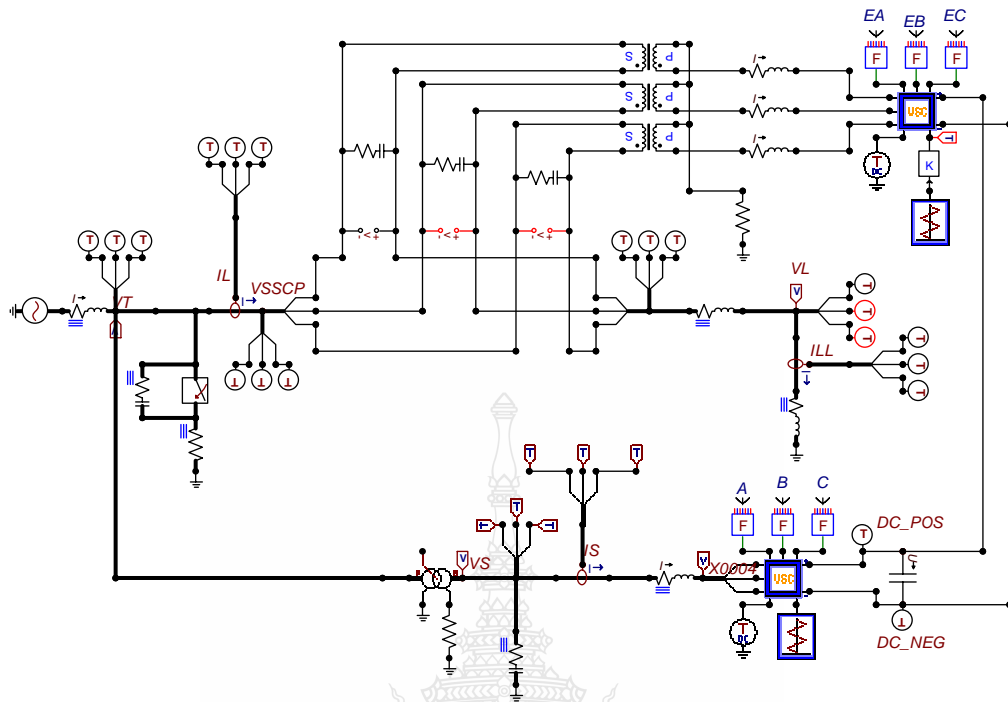
4.2 แบบจำลองของระบบควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า



รูปที่ ก.7 แบบจำลองระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

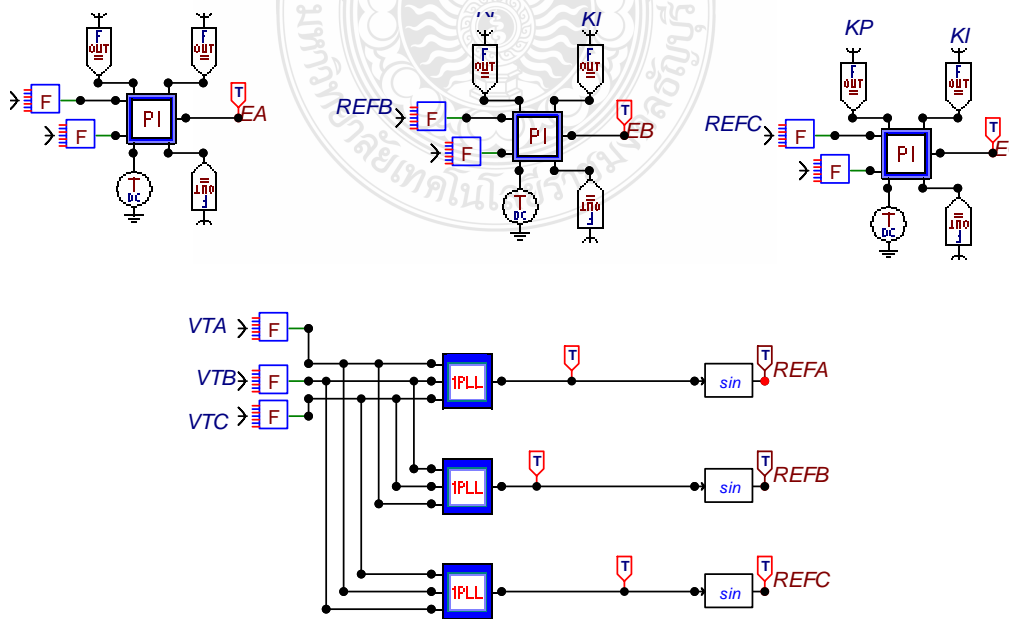
5. แบบจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ (ตามหัวข้อ4.4)

5.1 แบบจำลองวงจรตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ

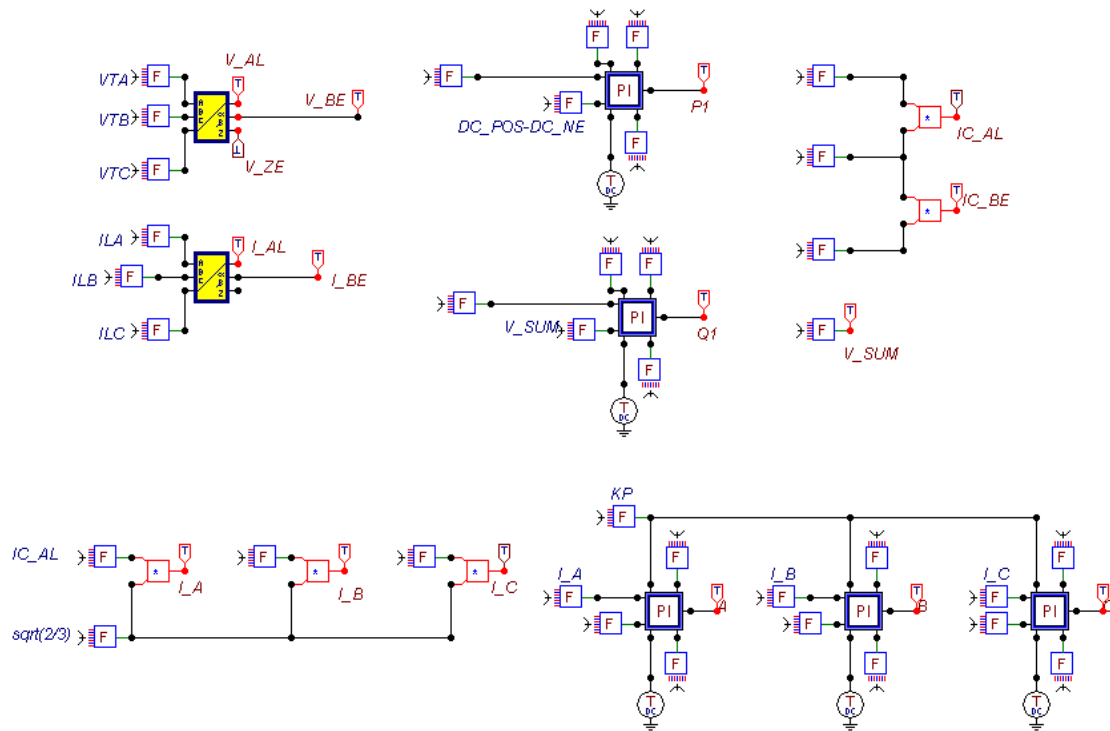


รูปที่ ก.8 วงจรการจำลองตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ

5.2 แบบจำลองของระบบควบคุมตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมในการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ



รูปที่ ก.9 แบบจำลองระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ต่อขนาน



รูปที่ ก.10 แบบจำลองระบบควบคุมของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ต่ออนุกรม



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายปานูมาศ แสนพวง
วัน เดือน ปี 9 พฤศจิกายน 2517
ที่อยู่ 121 หมู่ 2 ต.หนองอีบุตร อ.ห้วยผึ้ง จ.กาฬสินธุ์
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น เมื่อ พ.ศ.2541

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2541 – ปัจจุบัน ตำแหน่งพนักงานราชการ ทำหน้าที่สอนประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสกลนคร

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

ปานูมาศ แสนพวง และคณะ, “การประยุกต์ใช้ทฤษฎี Instantaneous Power Theory สำหรับการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ UPFC”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 32 , 28-30 ตุลาคม , ณ โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จ.ปราจีนบุรี 2552

Panumat Sanpoung Paisan Boonchiam and Boonyang Plagklang, “Analysis and Control Of UPFC for Voltage Compensation Using ATP/EMTP”, **International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education** , Chiang Mai, Thailand ,23-29 August 2009, pp. 92-101,