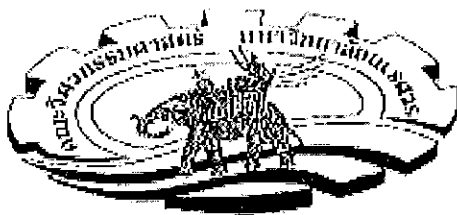


การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่ง
โดยใช้อุปกรณ์ FACTS
POWER FLOW CONTROL IN TRANSMISSION SYSTEM
USING FACTS DEVICES

นายสุชน ธีญญะเจริญ รหัส 48361981
นายเฉลิมพล สุขศิริ รหัส 48362117
นายศราวุธ โปชะกะ รหัส 48364494

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ.....2/เม.ย. 2553/.....
เลขทะเบียน.....14995727.....
เลขเรียกหนังสือ.....ฟ/ร.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร สท82 17 2551

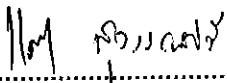
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2551

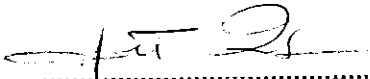


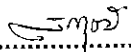
ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ	การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งโดยใช้อุปกรณ์ FACTS
ผู้ดำเนินโครงการ	นายสุชน รัชฎะเจริญ รหัส 48361981 นายเฉลิมพล สุขศิริ รหัส 48362117 นายศราวุธ โภชะกะ รหัส 48364494
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.แคทรียา สุวรรณศรี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิต มาลากร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม


.....ประธานกรรมการ
(ดร.แคทรียา สุวรรณศรี)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิต มาลากร)


.....กรรมการ
(อาจารย์ศราวุธ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

หัวข้อโครงการ	การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งโดยใช้อุปกรณ์ FACTS		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายสุชน ธีญญะเจริญ รหัส	48361981	
	นายเฉลิมพล สุขศิริ รหัส	48362117	
	นายศราวุธ โปะชะกะ รหัส	48364494	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.แคทรียา สุวรรณศรี		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด มาลากร		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2551		

บทคัดย่อภาษาไทย

โครงการนี้เป็นการศึกษาการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลป เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ขั้นตอนวิธีของนิวตันราฟสันในการคำนวณนี้ อุปกรณ์ Flexible AC Transmission Systems (FACTS) ถูกนำมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบซึ่งเป็นระบบ 5 บัส อุปกรณ์ FACTS ประกอบไปด้วย SVC TCSC และ UPFC เป็นการเชื่อมต่อแบบอนุกรม แบบขนาน และแบบผสม ตามลำดับการเริ่มต้นทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบต้นแบบที่ไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS ถูกใช้เป็นตัวแปรเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) สามารถควบคุมได้เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ ไม่เพียงแต่กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) สามารถควบคุมได้ขนาดของแรงดันบัสที่ต่ออุปกรณ์ยังสามารถควบคุมให้คงที่ เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) สามารถควบคุมได้เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบมีการเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) อีกทั้งยังสามารถรักษขนาดของแรงดันบัสที่ต่ออุปกรณ์เข้าไปให้คงที่จากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด ดังนั้นทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มเสถียรภาพของระบบ

Project Title Power Flow Control in Transmission System using FACTS Devices
Name Mr. Suthon Thanyacharoen ID. 48361981
Mr. Chalermphon Suksiri ID. 48362117
Mr. Saravuth Pochaga ID. 48364494
Project Advisor Dr. Cattareeya Suwanasri, D.Eng
Co- Project Advisor Assist. Prof. Tanit Malakorn, Ph.D
Major Electrical Engineering.
Department Electrical and Computer Engineering.
Academic Year 2008

.....

ABSTRACT

This project is a study of power flow control in transmission system by using MATLAB program as a tool to analyze power flow Newton-Raphson's algorithm is applied for this calculation. The equipment of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) is connected to system, which is 5-bus system. The FACTS device consists of SVC, TCSC, and UPFC, which are serial, parallel, and hybrid connection respectively. Starting with analysis of original power flow without FACTS connection active power and reactive power results are used as comparative. If SVC is connected in the system, not only reactive power flow can be controlled bus voltage, but also can be constantly variables maintained. When TCSC is connected active power flow can be controlled. When UPFC is connected in the system active power flow quantity and reactive power flow can be controlled. Therefore by using FACTS device, it is more effective in power flow control and increased stability of system.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยการให้คำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่อทฤษฎีของ โครงการ ตลอดจนการวิเคราะห์ผลจากการคำนวณของโปรแกรม และรูปแบบในการแสดงผลจาก ดร. แคทรีชา สุวรรณศรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการนี้ ผศ.ดร. ธนิต มาลากร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการนี้ และอาจารย์สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์ ซึ่งเป็นคณะกรรมการโครงการนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่คอยให้กำลังใจ ในการทำโครงการ และเป็นแรงบันดาลใจให้การดำเนินโครงการนี้สามารถผ่านปัญหาต่างๆมาจนถึงจุดนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาของโครงการ และคอยเป็นกำลังใจให้ในยามเหน็ดเหนื่อย ขอบคุณครับ

สุธน รัญญะเจริญ
เฉลิมพล สุขศิริ
ศราวุธ โพชะกะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน	1
1.3 ขอบเขตโครงการงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการงาน	3
1.6 งบประมาณ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	4
2.2 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	4
2.3 เทคนิคการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าย้อนกลับ	11
2.4 การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าย้อนกลับโดยการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง	15
2.5 การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าย้อนกลับโดยใช้อุปกรณ์ในตระกูล Flexible AC Transmission Systems	25
บทที่ 3 การออกแบบโปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	
3.1 หลักการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบธรรมดา	54
3.2 หลักการคำนวณแบบวิธีนิวตันราฟสันแบบอุปกรณ์ SVC	58
3.3 หลักการคำนวณแบบวิธีนิวตันราฟสันแบบอุปกรณ์ TCSC	61
3.4 หลักการคำนวณแบบวิธีนิวตันราฟสันแบบอุปกรณ์ UPFC	64

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง	
4.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 5 บัส.....	67
4.2 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์ เข้าไปในระบบ.....	70
4.3 ตารางเปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อทำการต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไป ในระบบ.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 บทสรุป.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	95
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	2
2.1 ตารางแจกแจงค่าที่กำหนดให้ และ ค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	9
4.1 แสดงการเปรียบเทียบการส่งจ่ายกำลัง ไฟฟ้า (Sending End) ในสายส่งเมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ.....	70
4.2 แสดงการเปรียบเทียบการรับกำลังไฟฟ้า (Receiving End) ในสายส่งเมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ	72
4.3 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลัง ไฟฟ้าในสายส่ง (Power Line Loss) เมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ.....	74
4.4 แสดงการเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 3-4 และระหว่างบัส 4-5	76
4.5 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่บัส (Voltage Bus) ต่างๆ เมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ.....	77
4.6 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่บัส (Power Bus) ต่างๆ เมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ.....	79
4.7 แสดงพิกัดกำลังไฟฟารวมทั้งระบบ	79
4.8 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าชั้สเซปแดนซ์ขนาน เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปที่บัส 3.....	81
4.9 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่ารีแอคแตนซ์อนุกรม เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไประหว่างบัส 3- 4.....	82
4.10 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ตั้งไว้เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไประหว่างบัส 3- 4.....	83
4.11 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอเตอร์อนุกรม เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3- 4.....	84
4.12 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอเตอร์อนุกรม เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3- 4.....	85
4.13 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอเตอร์ขนาน เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3- 4.....	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอเตอร์ชานาน เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3-4.....	88
4.15 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ตั้งไว้ เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3-4.....	89
4.16 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3-4.....	90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า	13
2.2 แสดงรูปสามเหลี่ยมกำลังที่มีตัวประกอบกำลัง 2 ค่า	14
2.3 แสดงการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบ	15
2.4 แสดงการต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ	17
2.5 แสดงการเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนของสายส่งที่มี Power Factor เป็นแบบล้าหลัง โดย (ก) และ (ค) ไม่ต่อคาปาซิเตอร์อนุกรม ส่วน (ข) และ (ง) ต่อคาปาซิเตอร์อนุกรม	20
2.6 แสดงการเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนของสายส่งที่มี Power Factor เป็นแบบล้าหลัง โดย (ก) และ (ค) ไม่ต่อ Shunt Capacitor ส่วน (ข) และ (ง) ต่อ Shunt Capacitor	21
2.7 แสดงผลของการต่อคาปาซิเตอร์แบบคงที่ในสายส่ง (ก) สายส่งที่มีการกระจายโหลดแบบสม่ำเสมอ (ข) ในกรณีที่โหลดมีค่ามาก (ค) ในกรณีที่โหลดมีค่าน้อย	22
2.8 วงจรหลักของไทรสเตอร์ (ก) Thyristor-Controlled Reactor (TCR) พื้นฐาน (ข) สัญลักษณ์วงจรของไทรสเตอร์	26
2.9 รูปคลื่นกระแสใน Thyristor-Controlled Reactor (TCR) พื้นฐาน (ก) $\alpha = 90^\circ$, $\sigma = 180^\circ$ (ข) $\alpha = 100^\circ$, $\sigma = 160^\circ$ (ค) $\alpha = 130^\circ$, $\sigma = 100^\circ$ (ง) $\alpha = 150^\circ$, $\sigma = 60^\circ$ เพื่อความสะดวก กำหนดมุมในหน่วยองศา	28
2.10 Static VAR Compensator และคุณลักษณะกระแส-แรงดันของระบบไฟฟ้า	30
2.11 รูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าแบบขั้นธรรมชาติของ Static VAR Compensator (ก) การแสดงความชันและ (ข) การแสดงความชันและการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า	31
2.12 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่ถูกคั่ง โดยรูปแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Model) และรูปแบบซัสเซปแทนซ์ (Susceptance Model)	32
2.13 ซัสเซปแทนซ์ขนานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Shunt Susceptance)	33
2.14 โครงสร้างทางกายภาพของ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)	35
2.15 วงจรเทียบเท่าของ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)	35
2.16 วงจรเทียบเท่าของ Thyristor-Controlled Series Compensator (ก) การดำเนินการในย่านคาปาซิทีฟ (Capacitive Region)	36
2.17 สัญลักษณ์ของวงจรสำหรับ (ก) เกทเทิร์นออฟไทรสเตอร์ (Gate Turn-Off Thyristor) และ (ข) อินซูลेटเต็ดเกตไบโพลาร์ไทรสเตอร์ (Insulated Gate Bipolar Transistor)	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แบบโครงสร้างสามเฟสของ Voltage Source Converter (VSC) 2 ระดับ โดยใช้ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBTs) เป็นสวิตช์	40
2.19 การดำเนินการของ Pulse-Width Modulation (ก) การเปรียบเทียบความถี่พื้นฐานของฟังก์ชันรูปไซน์ (Sainusoidal) กับสัญญาณสามเหลี่ยมที่ความถี่สูง (ก) ผลลัพธ์ต่อเนื่องจาก (ข) จะได้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (ค) สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์แรงดัน	43
2.20 1 ขาของ Voltage Source Converter (VSC)	45
2.21 การดำเนินการพื้นฐานของ Voltage Source Converter (VSC) (ก) VSC ถูกเชื่อมต่อเข้ากับบัสของระบบ (ข) เวกเตอร์สเปซ (Space Vector) แสดงการดำเนินการล่าหลัง (Lagging) (ค) เวกเตอร์สเปซ(Space Vector) แสดงการดำเนินการแบบนำหน้า (Leading)	46
2.22 ระบบของ Unified Power Flow Controller (UPFC) (ก) ท้ายต่อท้ายของ Voltage Source Converters (VSC) 2 ตัว โดย VSC ตัวแรกถูกเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายกระแสสลับ (AC) โดยใช้หม้อแปลงขนานและ VSC ตัวที่สองถูกเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายกระแสสลับ (AC) โดยใช้หม้อแปลงอนุกรม (ข) วงจรเทียบเท่าของ UPFC	48
2.23 วงจรเทียบเท่าของ Unified Power Flow Controller (UPFC)	49
3.1 แสดงโพลีชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันแบบธรรมดา	54
3.2 แสดงโพลีชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าสู่ระบบ	58
3.3 แสดงโพลีชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าสู่ระบบ	61
3.4 แสดงโพลีชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าสู่ระบบ	64
4.1 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาซึ่งไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบ	68
4.2 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบที่บัส	68
4.3 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบระหว่างบัส 3 และบัส 4	69
4.4 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบระหว่างบัส 3 และบัส 4	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นต้องสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในแต่ละปี อีกทั้งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไปให้ผู้ใช้งานไฟฟ้าถูกใช้มากขึ้น และเกิดความสูญเสียขึ้นในระบบเนื่องจากภาระทางกำลังไฟฟ้า ระยะทางในการส่งกำลังไฟฟ้า และตัวนำของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเอง ส่งผลให้การส่งกำลังไฟฟ้าอาจมีไม่เพียงพอ

ดังนั้นจึงจัดทำโครงการนี้ เพื่อศึกษาและค้นคว้าปรับปรุงประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยจะเลือกใช้วิธีการทำให้ประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด จากวิธีที่มีอยู่ เช่น การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า การเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้า การเปลี่ยนระบบการส่งจ่ายจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง และวิธี Flexible AC Transmission System (FACTS) เช่น Static VAR Compensator (SVC), Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), Unified Power Flow Controller (UPFC) เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพโดยการเพิ่มการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

2. ปรับปรุงประสิทธิภาพของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแมทแลปในการคำนวณ

1.3 ขอบเขตโครงการ

1. ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ SVC TCSC และ UPFC ในระบบ 5 บัส

2. ปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการคำนวณ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2551							ปี 2552		
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	↔									
2. ศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจาก ภาระทางไฟฟ้า และการปรับปรุงระบบ			↔							
3. ศึกษาการใช้โปรแกรมแมทเพล			↔							
4. สอบหัวข้อโครงการ					↔					
5. พัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มี ประสิทธิภาพสูงสุด โดยการวิธีคำนวณ						↔				
6. ปรับปรุงประสิทธิภาพในการส่งจ่าย กำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยใช้ โปรแกรมแมทเพลเป็นเครื่องมือในการ คำนวณ							↔			
7. จัดทำรายงานสรุปผลงานและสอบ โครงการ										↔

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. เข้าใจหลักการในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงขึ้น
2. ช่วยเพิ่มกำลังสำรองให้กับระบบไฟฟ้า ทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดที่เป็นกำลังงานจริงได้มากขึ้น
3. ช่วยลดแรงดันตกในระบบไฟฟ้า
4. ทำให้ระบบจำหน่ายมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

1.6 งบประมาณ

1. ค่าเอกสารและค่าเช่าเล่มโครงการฉบับสมบูรณ์	1,000	บาท
2. ค่าอุปกรณ์ในการทำโครงการ	1,000	บาท
3. ค่าหนังสือ	500	บาท
4. ค่าพิมพ์เอกสาร	<u>500</u>	บาท
รวมเป็นเงิน (สามพันบาทถ้วน)	<u>3,000</u>	บาท

หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นประเด็นที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากปัจจุบันความหลากหลายของโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะโหลดประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติหรืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งมีความเสี่ยงสูงและสามารถรับรู้ได้เร็วถึงระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดทำได้น้อยลงเป็นผลมาจากอิมพีแดนซ์รวมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นและแรงดันมีค่าลดต่ำลง การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจะทำให้อิมพีแดนซ์รวมในระบบมีค่าลดลงและแรงดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น และโหลดสามารถทำงานได้เป็นปกติ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยเกี่ยวข้องกับระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า การชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ได้แก่ การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและระบบสายส่ง วิธีการควบคุมแรงเคลื่อน การแก้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของสายส่ง ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

2.2 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

2.2.1 ระบบส่งไฟฟ้า

โรงไฟฟ้าต่างๆ ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแรงดันระดับหนึ่ง แล้วส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันให้สูงขึ้นแล้วส่งเข้าสู่ระบบส่งไฟฟ้า เริ่มต้นที่ลานไกไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแล้วไปสิ้นสุดที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง โดยมีศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าคอยควบคุมการผลิตและส่งไฟฟ้าให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงจะมีหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าแล้วส่งให้ฝ่ายจำหน่ายส่งบริการประชาชนต่อไปหรืออาจจะส่งให้โรงงานอุตสาหกรรม หรือส่งต่อไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงแห่งอื่นที่มีสายส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงกัน ในประเทศไทยมีสถานีไฟฟ้าแรงสูงตั้งกระจายตามแหล่งชุมชน และอุตสาหกรรมทั่วไป มีสายส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ทำให้การดำเนินการผลิตและส่งกระแสไฟฟ้าเป็นไปด้วยดี

สายส่งไฟฟ้า

แหล่งผลิตไฟฟ้ามักจะตั้งอยู่ห่างไกลจากแหล่งใช้งาน เพื่อลดการสูญเสียภายในสายส่งไฟฟ้าที่มีระยะทางไกลให้น้อยลง จึงทำการเพิ่มแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของประเทศไทยประกอบด้วยแรงดันระดับต่างๆ คือ ขนาดแรงดัน 69, 115, 230 กิโลโวลต์และขนาดแรงดันสูงพิเศษ 500 กิโลโวลต์

สถานีไฟฟ้าแรงสูง

เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าซึ่งศูนย์กลางการใช้ไฟฟ้าอยู่ห่างไกลจากแหล่งผลิตไฟฟ้า จึงต้องส่งไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้าระดับสูง เมื่อเข้าใกล้แหล่งใช้ไฟฟ้าก็ลดระดับแรงดันลงมาก่อนที่จะส่งไปจ่ายให้กับผู้ใช้ต่อไป การลดแรงดันจากระดับสูงลงไปถึงแรงดันระดับหนึ่งที่มีการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) จะนำไปจ่ายถึงผู้ใช้ไฟฟ้านั้นกระทำกันในจุดที่เรียกว่า "สถานีไฟฟ้าแรงสูง" สถานีดังกล่าวจะทำหน้าที่ควบคุมคุณภาพของไฟฟ้าที่จ่าย และมีหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ลดแรงดันของไฟฟ้าที่จ่ายออก ซึ่งปกติจะลดลงมาเหลือเพียง 11 หรือ 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ แล้วแต่มาตรฐานที่กำหนดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ประจำอยู่ตามสถานีไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ นั้น มีความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าที่ปริมาณระดับหนึ่ง โดยเหตุนี้เมื่อมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็จำเป็นต้องติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีพิกัดเพียงพอ

2.2.2 แบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Modelling of a Power Transmission Line)

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่กระจายตามความยาวของสายส่งต่อเฟส (Distributed Parameters Per Phase of a Transmission Line) ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ในบทนี้จะนำพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้มาสร้างเป็นแบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่สมบูรณ์เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมของสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ในสายส่ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นสายส่งที่มีความยาวได้ตั้งแต่ไม่กี่สิบกิโลเมตร ไปจนถึง 500 km หรืออาจจะมากกว่า 1000 km ในบางกรณี ทำให้แบบจำลองที่จะนำมาใช้อาจจะจำแนกได้ตามความยาวสายส่งเป็น

สายส่งระยะใกล้ (Short-Line Model) ที่มีความยาวไม่เกิน 80 km สืบเนื่องมาจากระยะทางที่สั้น ทำให้ความจุไฟฟ้าขนานของสายส่งเมื่อคิดตลอดทั้งความยาวสายมีค่าน้อย นั้นหมายความว่าค่าอิมพีแดนซ์ขนานที่เกิดจากความจุไฟฟ้านี้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมที่เกิดจากความต้านทานและความเหนี่ยวนำทำให้ละเลยผลอันนี้ได้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้จะคิดตลอดทั้งความยาวสายรวมกันเป็นก้อนเดียวที่เรียกว่า Lumped Parameters

สายส่งระยะกลาง (Medium-Line Model) มีความยาวสายตั้งแต่ 80 km ไปจนถึง 250 km เมื่อความยาวสายเพิ่มมากขึ้นความจุไฟฟ้าจะเริ่มมีผล ทำให้ไม่สามารถละเลยได้ การวิเคราะห์สายส่งที่มีความยาวสายในช่วงนี้นั้น ปกติสามารถประมาณได้โดยการรวมค่าความจุไฟฟ้าตลอดทั้งความยาวสายไปไว้ที่ตรงกึ่งกลางสายที่เรียกว่าแบบจำลองรูปตัวที (T- Model) หรืออาจจะแบ่งครึ่ง

ไปไว้ที่ต้นสายและอีกครึ่งไปไว้ที่ปลายสายเรียกว่าแบบจำลองรูปพาย (π -Model) แบบจำลองของสายส่งระยะกลางที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง คือ แบบจำลองรูปพาย อย่างไรก็ตามในบางกรณีถึงแม้สายส่งจะมีความยาวไม่มากนัก หากต้องการความถูกต้องของการคำนวณสูง แบบจำลองที่สมบูรณ์โดยใช้สมการคลื่นจะถูกนำมาใช้ซึ่งสมการที่ว่านี้เป็นที่มาของแบบจำลองสายส่งระยะไกลแบบจำลองนี้ยังคงเป็นแบบ Lumped Parameter เช่นกัน เพียงแต่เพิ่มส่วนของความจุไฟฟ้าเข้ามาด้วยนั่นเอง

สายส่งระยะไกล (Long-Line Model) แบบจำลองนี้จะใช้กับสายส่งที่มีความยาวสายมากกว่า 250 km หรือในกรณีของสายส่งที่ไม่ยาวมากนักแต่ต้องการความละเอียดในการคำนวณสูง แบบจำลองชนิดนี้จะทำการแบ่งช่วงความยาวสายเป็นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า Finite Cell จากนั้น จะแทนส่วนย่อยๆ นี้ด้วยพารามิเตอร์กระจาย (Distributed Parameters) ทั้ง 3 ตัว สมการที่กำกับจะใช้สมการคลื่นในรูปสมการอนุพันธ์เชิงเส้น อย่างไรก็ตามถ้าไม่สนใจแรงดันและกระแส ณ ตำแหน่งอื่นๆ เลยนอกจากต้นสายกับปลายสาย สมการจะถูกลดรูปให้เป็นเมตริกซ์เชิงซ้อนขนาด 2×2 เพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ต้นสายและที่ปลายสายในรูปของวงจร Two-Port ได้

2.2.3 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะ (Parameters of an Overhead Power Transmission System)

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีขนาดใหญ่ประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้าจำนวนมาก โดยปกติแล้วแหล่งพลังงานที่นำมาผลิตไฟฟ้า เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติแม่น้ำหรืออื่นๆ มักจะมีสถานที่ตั้งที่ห่างไกลจากตัวเมือง หรือเขตอุตสาหกรรมซึ่งเป็นจุดที่มีการใช้ไฟฟ้า โดยปกติมีระยะทางอาจจะเกิน 100 km ทำให้การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยแรงดันต่ำมีข้อจำกัดในเรื่องแรงดันตกและกำลังงานสูญเสียที่มีค่าสูง ทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระยะทางไกลๆ จะทำการส่งที่ระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันทำงานของโหลดปกติ โดยปกติแล้วโหลดด้านผู้ใช้ไฟจะรับไฟที่ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz, 380/220 Vrms แรงดันนี้จัดเป็นแรงดันต่ำ (Low Voltage) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นที่โรงไฟฟ้ามักมีขนาดแรงดันประมาณ 10 – 20 kV แรงดันนี้จัดอยู่ในระดับแรงดันปานกลาง (Medium Voltage) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคือระบบที่ต่อเชื่อมระหว่างโรงไฟฟ้าเพื่อนำกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น ไปจ่ายโหลด อย่างไรก็ตาม ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านี้กำหนดให้สิ้นสุดที่สถานีไฟฟ้าย่อยเท่านั้น โดยเริ่มจากโรงไฟฟ้าที่แรงดันประมาณ 10 – 20 kV นี้จะถูกแปลงให้สูงผ่านหม้อแปลงกำลังให้เป็นแรงดันสูง อาจจะเป็น 69, 115, 230, 345 หรือ 500 kV ขึ้นกับระบบที่นำมาใช้และระบบส่งจ่ายนี้จะมีหม้อแปลงกำลังทำหน้าที่แปลงแรงดันให้เป็นแรงดันจำหน่ายที่สถานีไฟฟ้าย่อยปลายทางต่อไป โดยแรงดันจำหน่ายสำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนี้จะมีค่าเป็น 22 kV สำหรับการไฟฟ้านครหลวงมีค่าเป็น 24 kV ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะสิ้นสุดลงที่สถานีไฟฟ้าย่อยเมื่อแรงดันถูกลดระดับลงเหลือ 22 kV หรือ 24 kV นั่นเอง ระบบที่มารับช่วงต่อจากนี้เรียกว่า

ระบบจำหน่าย (Distribution System) ประกอบด้วยสายป้อนที่ถูกขึงอยู่บนเสาปูนพบเห็นได้ทั่วไปตามถนนต่างๆ และระบบจำหน่ายนี้จะไปสิ้นสุดที่โหนดของผู้ใช้ไฟ อาจจะเป็นหม้อแปลงที่ติดตั้งหน้าโรงงานหรืออาคารต่างๆ ซึ่งจะมีหม้อแปลงกำลังของผู้ใช้ไฟรับช่วงต่อ โดยทำหน้าที่แปลงแรงดันจาก 22 kV (24 kV) ให้เป็น 380/220 V หรือ 400/230 V ระบบไฟฟ้าที่อยู่หลังหม้อแปลงตัวนี้จะเป็นระบบไฟฟ้าภายในโรงงาน ภายในอาคารสำนักงานหรือที่พักอาศัยต่างๆ เรียกว่า Electrical Building System โดยระดับแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจำแนกได้ ดังนี้

- แรงดันต่ำ (Low Voltage: LV) < 1 kV ใช้ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ
- แรงดันปานกลาง (Medium Voltage: MV) < 69 kV ใช้ในระบบจำหน่ายและระบบผลิต
- แรงดันสูง (High Voltage: HV) < 230 kV ใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง
- แรงดันสูงพิเศษ (Extra-High Voltage: EHV) < 765 kV ใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูงพิเศษ
- แรงดันสูงยิ่งยวด (Ultra-High Voltage: UHV) ≥ 765 kV ใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูงยิ่งยวด

2.2.4 ชนิดของตัวนำ

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังนั้นนิยมใช้สายเปลือยเดินลอยในอากาศที่เรียกว่าระบบ Overhead Power Line ตัวนำที่นำมาใช้ส่งกำลังงานไฟฟ้า ได้แก่ ACSR (Aluminium Conductor Steel-Rienforced), ACAR (Aluminium Conductor Alloy-Rienforced), AAC (All Aluminium Conductor) และ AAAC (All-Aluminium Alloy Conductor) ตัวนำที่กล่าวถึงนี้เป็นชนิดเปลือยเดินลอยในอากาศและปกติไม่ใช่ลวดตัวนำชนิดตัวนำเดี่ยว (Single-Conductor) ตัวนำที่ใช้ อาจจะเป็นชนิดตีเกลียว (Stranded Conductor) และอาจจะเป็นแบบ Bundled Conductor ก็ได้

2.2.5 ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Line Resistance)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าพบว่า ความต้านทานของโลหะตัวนำอันเกิดจากการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

2.2.6 ความเหนี่ยวนำของสายส่ง (Line Inductance)

ลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะสร้างอำนาจแม่เหล็กออกมารอบๆตัวนำนั้นตามกฎของแอมแปร์ (Ampere Circuital Law) ความสัมพันธ์ระหว่างอำนาจแม่เหล็กที่สร้างขึ้นกับปริมาณกระแสที่ไหลในเส้นลวดจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น อัตราส่วนของอำนาจแม่เหล็กดังกล่าวกับกระแสจะเรียกว่าค่าความเหนี่ยวนำ (L) นั้นเอง โดยอำนาจแม่เหล็กที่ใช้ก็คือ ปริมาณฟลักซ์เชื่อมโยง λ ที่สร้างขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้น นั่นคือ

$$L = \lambda / I \quad (2.2)$$

ในระบบไฟฟ้ากำลังใช้การส่งด้วยระบบไฟฟ้า 3 เฟส อย่างไรก็ตาม ในการเริ่มพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งจะเริ่มต้นที่สายส่งตัวนำ 1 เส้นก่อน เพื่อศึกษาฟลักซ์เชื่อมโยงในกรณีของตัวนำเส้นเดียวที่ไม่ซับซ้อน จากนั้นจะพิจารณาสายส่งตัวนำ 1 เฟส ที่ประกอบไปด้วยสาย Line และ Neutral จำนวนทั้งสิ้น 2 เส้น จากนั้นจะนำเข้าสู่ระบบสายส่ง 3 เฟสที่สมบูรณ์แบบ แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุผลทางด้านต้นทุนและความสมดุลของการจัด โหลดที่สถานีไฟฟ้าย่อย ระบบส่งจ่าย 3 เฟสปกติเป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสที่สมดุลใช้สายส่ง 3 เส้น ไม่มีสายนิวทรัล

2.2.7 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า (Power Flow Analysis)

ข้อมูลสำหรับการศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้า (Information for Power Flow Studying)

1. เมตริกซ์แอดมิตแดนซ์ [Y] และเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ [Z] ของระบบ
2. บัสแกว่ง หรือ บัสอ้างอิง (Swing Bus, Slack Bus, Reference Bus) คือ บัสอ้างอิงของระบบ (Reference Bus) ที่บัสนี้จะกำหนดค่าแรงดัน และ มุมของแรงดันไว้
3. บัสภาระไฟฟ้า (Load Bus) คือ บัสที่มีภาระไฟฟ้าต่ออยู่ที่บัสนี้จะกำหนด ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (P , Q)
4. บัสที่มีแรงดันคงที่ (Voltage Magnitude Constant Bus, Generator Bus) คือ บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริง และ ขนาดของแรงดัน (P , V)
5. อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแดนซ์ขนานของสายส่ง เวลาเพิ่มอุปกรณ์เข้ามาในระบบ
6. ข้อมูลอื่นๆ เช่น พิกัดกำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง พิกัดตัวเก็บประจุขนาน และ การตั้ง Tap ของหม้อแปลง

ค่าที่กำหนดให้ และ ค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ

ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ขนาดของแรงดันไฟฟ้า (V) และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า (δ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดค่ามาให้ หรือต้องคำนวณ ณ บัสต่างๆ ได้แก่ บัสอ้างอิง บัสภาระไฟฟ้า และบัสที่มีแรงดันคงที่ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแจกแจงค่าที่กำหนดให้ และ ค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

บัส	ค่าที่กำหนดมาให้	ค่าที่ต้องคำนวณ
บัสอ้างอิง (Swing Bus)	V δ	P Q
บัสภาระไฟฟ้า (Load Bus)	P Q	V δ
บัสที่มีแรงดันคงที่ (Gen. Bus)	P V	Q δ

ขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดไฟลด์ด้วยวิธี Newton - Raphson

1. ที่ Load Bus

- ทราบค่า P_i^{sch} และ Q_i^{sch}

- กำหนดค่าแรงดันบัสเริ่มต้น โดยกำหนดให้เท่ากับบัสอ้างอิง (Swing Bus) หรือ

กำหนด $|V_i^{(0)}| = 1$ และ $\delta_i^{(0)} = 0$

- หาค่า $P_i^{(k)}, Q_i^{(k)}$ จาก

$$P_i = \sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_j + \delta_j - \delta_i) \quad (2.3)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_j + \delta_j - \delta_i) \quad (2.4)$$

- หาค่า $\Delta P_i^{(k)}, \Delta Q_i^{(k)}$ จาก

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.5)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.6)$$

2. ที่ Gen. Bus

- ทราบค่า P_i^{sch}

- กำหนดค่ามุมเฟสของแรงดันบัสเริ่มต้น โดยกำหนดให้เท่าของบัสอ้างอิง (Swing Bus) หรือ กำหนด $\delta_i^{(0)} = 0$

- หาค่า $P_i^{(k)}$ จากสมการ (2.3)

- หาค่า $\Delta P_i^{(k)}$ จากสมการ (2.5)

3. หาสมาชิกแต่ละตัวในเมตริกซ์จาโคเบียน $[J]$

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

โดยแทนค่า $V_i^{(k)} \angle \delta_i^{(k)}, V_j^{(k)} \angle \delta_j^{(k)}, Y_{ij}^{(k)} \angle \theta_{ij}^{(k)}$

4. หาค่า $\Delta \delta_i^{(k)}, \Delta |V_j^{(k)}|$ จาก

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i^{(k)} \\ \Delta |V_j^{(k)}| \end{bmatrix} = [J^{(k)}] \begin{bmatrix} \Delta P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

5. หาค่า $\delta_i^{(k+1)}, |V_i^{(k+1)}|$ จาก

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.9)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.10)$$

6. กลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่ โดยใช้ $\delta_i^{(k+1)}, |V_i^{(k+1)}|$
7. ไปเรื่อยๆจนกระทั่ง $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \epsilon_1$ และ $|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \epsilon_2$ เมื่อ ϵ_1 และ ϵ_2 มีค่าน้อยมาก โดยทั่วไปแล้ว กำหนดให้ $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.5 \times 10^{-4}$

2.3 เทคนิคการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

กำลังไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้ากระแสสลับมีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. กำลังจริง (Real Power)
2. กำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power)
3. กำลังปรากฏ (Apparent Power)

2.3.1 กำลังจริง (Real Power)

กำลังจริง (P) คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานรูปแบบต่างๆที่โหลด เช่น เตาหลอมโลหะเป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นความร้อนหรือมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลและหลอดไฟเป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นแสงสว่าง เป็นต้น กำลังชนิดนี้คือกำลังเฉลี่ย (Average Power) ที่วัดได้จากวัตต์มิเตอร์ มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) ถ้าหน่วยใหญ่จะเป็น kW และ MW

องค์ประกอบทางไฟฟ้า (Element) ที่ทำให้เกิดกำลังจริงนั้น สามารถเขียนแทนด้วยความต้านทาน (R) ได้ และค่าของกำลังจริงจะหาได้จากความสัมพันธ์ของกระแส (I) และความต้านทาน (R) ดังสมการ

$$P = I^2 R \quad (2.11)$$

2.3.2 กำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power)

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานรูปอื่นชั่วคราว โดยจะถูกเก็บรักษาไว้ในตัวเก็บพลังงานเพียงครึ่งวัฏจักร (Half Cycle) และจะส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่าย พร้อมกับเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งในครึ่งวัฏจักรต่อไป ทำให้กำลังเฉลี่ยในหนึ่งวัฏจักรเป็นศูนย์ หรืออาจกล่าวได้ว่ากำลังรีแอกทีฟไม่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า แต่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวมัน ตัวเก็บพลังงานดังกล่าวได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) กล่าวคือตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปของสนามแม่เหล็ก แต่ตัวเก็บประจุจะเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า เนื่องจากกำลังรีแอกทีฟที่เก็บรักษาไว้ในตัวเหนี่ยวนำ (Q_L) และเก็บไว้ในตัวเก็บประจุ (Q_C) นั้นเกิดต่างเฟสกัน 180 องศา ดังนั้นกำลังรีแอกทีฟ (Q_L) จึงไม่

จำเป็นต้องรับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงก็ได้ เพียงแต่ให้ตัวเก็บประจุ (C) จ่ายกำลังส่วนนี้แทน และทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายกำลังสำรองให้กับตัวเหนี่ยวนำ (L) ในทำนองกลับกันถ้าโหลดต้องการกำลังรีแอกทีฟ (Q_C) ก็ให้ตัวเหนี่ยวนำ (L) จ่ายกำลังส่วนนี้แทนได้เช่นเดียวกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าตัวเก็บพลังงานทั้งสองชนิดนี้สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้แก่กันและกันได้โดยไม่ต้องพึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งหลักการนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของวงจรนั่นเอง ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในภายหลัง กำลังชนิดนี้วัดได้จากวาร์มิเตอร์ มีหน่วยเป็นวาร์ (VAR) ซึ่งย่อมาจาก Volt Ampere Reactive ถ้าหน่วยใหญ่จะเป็น kVAR และ MVAR

องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังรีแอกทีฟนั้น สามารถเขียนแทนด้วยรีแอกแตนซ์ (X) ซึ่งอาจจะเป็น X_L หรือ X_C ก็ได้ และค่าของกำลังรีแอกทีฟจะหาได้จากความสัมพันธ์ของกระแส (I) และรีแอกแตนซ์ (X) ดังสมการ

$$Q = I^2 X \quad (2.12)$$

2.3.3 กำลังปรากฏ (Apparent Power)

กำลังปรากฏ (S) คือ กำลังไฟฟ้ารวม ตามปกติใช้เป็นค่าบอกความสามารถในการรับกำลังงานของโหลดหรือการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย กำลังชนิดนี้หาได้จากผลคูณของแรงดัน (V) ที่ตกคร่อมอุปกรณ์ และกระแส (I) ที่ไหลผ่านอุปกรณ์นั้นๆ จึงมีหน่วยเป็นโวลต์แอมแปร์ (VA) ถ้าหน่วยใหญ่จะเป็น kVA หรือ MVA

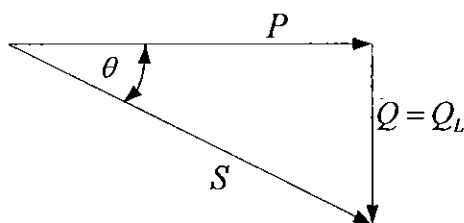
องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังปรากฏนั้น สามารถเขียนแทนด้วยอิมพีแดนซ์ (Z) ได้ และค่ากำลังปรากฏจะหาได้จากความสัมพันธ์ของกระแส (I) และอิมพีแดนซ์ (Z) ดังสมการ (2.13) ความสัมพันธ์ของกำลังจริง (P) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) เป็นดังสมการ (2.14)

$$S = I^2 Z \quad (2.13)$$

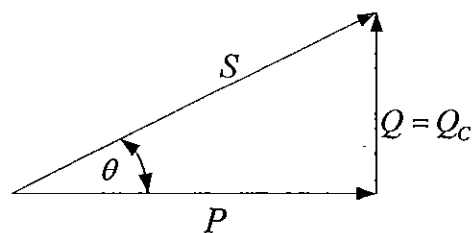
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.14)$$

2.3.4 การใช้รูปสามเหลี่ยมมุมฉากแทนกำลังไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.14) แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าทั้งสามชนิดจะประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพอดี และเรียกรูปสามเหลี่ยมนี้ว่า รูปสามเหลี่ยมกำลัง (Power Triangle) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



(ก) สามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสล่าหลัง



(ข) สามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสนำหน้า

รูปที่ 2.1 แสดงรูปสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า [1].

สามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสล่าหลัง เกิดจากการแตกแรงของกระแสล่าหลังตามรูปที่ 2.1 และใช้แรงดัน (V) คูณทุกด้านของสามเหลี่ยมกระแส ก็จะกลายเป็นสามเหลี่ยมกำลัง ซึ่งในกรณีนี้ กำลังรีแอกทีฟ (Q) ของวงจรก็คือ กำลังรีแอกทีฟชนิดเหนี่ยวนำ (Q_L) นั่นเอง สำหรับสามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสนำหน้าจะเกิดจากวงจรชนิดความจุไฟฟ้า ซึ่งค่า Q ที่แสดงก็คือ กำลังรีแอกทีฟชนิดความจุไฟฟ้า (Q_C) เช่นเดียวกัน จากรูปที่ 2.1 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างด้านต่างๆ ดังนี้

$$P = S \cos \theta = VI \cos \theta \quad (2.15)$$

$$\dots Q = S \sin \theta = VI \sin \theta \quad (2.16)$$

2.3.5 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) คือ ค่าคงที่เฉพาะของภาระไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่ง หรือ ค่าคงที่ของกลุ่มภาระไฟฟ้าที่บอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนไปเป็นกำลังจริง จากรูปสามเหลี่ยมกำลังอาจหาค่าตัวประกอบกำลังได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังจริง (P) ต่อกำลังปรากฏ (S) และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.17)

$$\text{ตัวประกอบกำลัง(P.F.)} = \frac{\text{real power}(P)}{\text{reactive power}(S)} = \frac{VI \cos \theta}{VI} = \cos \theta = \frac{R}{Z} \quad (2.17)$$

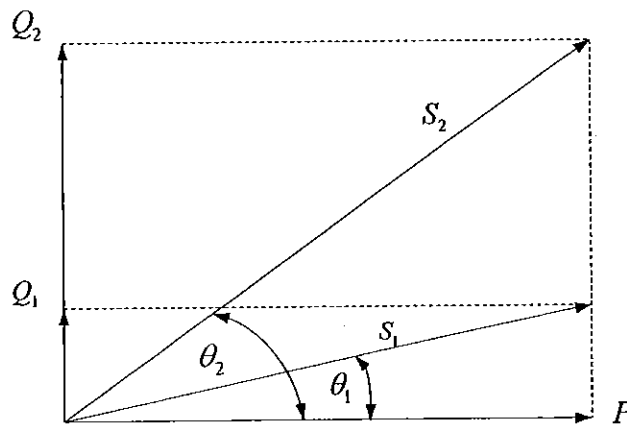
จากสมการ (2.17) แสดงให้เห็นว่าตัวประกอบกำลังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนขององค์ประกอบทางไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะของโหลดนั่นเอง โดยทั่วไปตัวประกอบกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่การบอกค่าของตัวประกอบกำลังส่วนมากมักจะบอกเป็นคำร้อยละ

ตัวประกอบกำลังอาจแบ่งตามองค์ประกอบทางไฟฟ้าได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. ตัวประกอบกำลังชนิดยูนิตี (Unity Power Factor)
2. ตัวประกอบกำลังชนิดล่าหลัง (Lagging Power Factor)
3. ตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้า (Leading Power Factor)

2.3.6 ผลเสียที่เกิดจากตัวประกอบกำลังต่ำ

จากรูปที่ 2.2 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นกำลังปรากฏ 2 ค่าที่จ่ายกำลังจริงได้เท่ากัน ถ้าเขียนสมการของกำลังปรากฏให้อยู่ในรูปของเลขเชิงซ้อน จะได้ดังนี้คือ $S_1 = P + jQ_1$ และ $S_2 = P + jQ_2$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อแตกแรงออกเป็น 2 แนว จะได้กำลังจริง (P) เท่ากัน แต่กำลังรีแอกทีฟ (Q) จะแตกต่างกัน ตัวที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟมากกว่าจะมีตัวประกอบกำลัง (P.F.) ต่ำกว่า และมีมุม θ กว้างกว่า



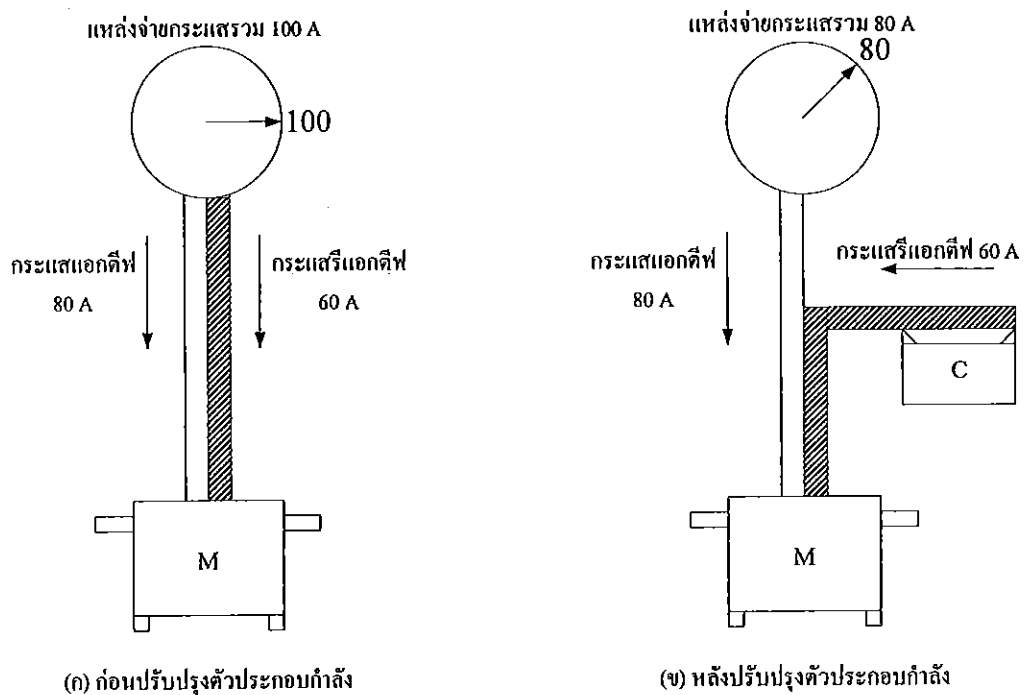
รูปที่ 2.2 แสดงรูปสามเหลี่ยมกำลังที่มีตัวประกอบกำลัง 2 ค่า [1].

เนื่องจากกำลังปรากฏเป็นผลคูณระหว่างแรงดันและกระแส ถ้าดูรูปจะเห็นว่าขนาด S_2 ยาวกว่า S_1 ดังนั้นกระแสโหลด I_2 จึงมีค่ามากกว่ากระแสโหลด I_1 หรืออาจสรุปได้ว่าโหลดที่มีตัวประกอบกำลังต่ำจะใช้กระแสสูงแต่ได้กำลังจริงต่ำ และการที่ใช้กระแสสูงนี้เอง จะก่อให้เกิดผลตามมาดังนี้คือ

1. เกิดแรงดันตกในสาย
2. เกิดกำลังสูญเสียในสาย
3. หม้อแปลงจ่ายกำลังจริงได้น้อยกว่าที่ควร
4. เกิดแรงดันตกในหม้อแปลงมากกว่าที่ควร
5. เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลงมากกว่าที่ควร

2.4 การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เนื่องจากระบบที่มีตัวประกอบกำลังต่ำมีผลเสียต่อระบบหลายประการ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้น แต่เนื่องจากโหลดโดยทั่วไปมีตัวประกอบกำลังเป็นชนิดล่าหลังเกือบทั้งหมด ดังนั้นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงต้องใช้อุปกรณ์ที่ตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้ามาช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับ โหลด โดยไม่ต้องดึงกำลังส่วนนี้ออกมาจากแหล่งจ่าย (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลง) ซึ่งจะช่วยให้แหล่งจ่ายสามารถจ่ายกำลังจริงให้แก่โหลดได้สูงขึ้น



รูปที่ 2.3 แสดงการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบ [1].

จากรูปที่ 2.3 (ก) เป็นรูปก่อนปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะเห็นว่ามอเตอร์ต้องการกระแส 2 ส่วนคือ กระแสแอสแอกทีฟ 80 แอมแปร์ไปเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานกล และกระแสเสรีแอกทีฟ 60 แอมแปร์ไปสร้างสนามแม่เหล็ก รวมเป็นกระแสทั้งหมดเท่ากับ $\sqrt{(80)^2 + (60)^2}$ หรือ 100 แอมแปร์ ซึ่งกระแสจำนวนนี้ แหล่งจ่ายจะต้องจ่ายให้กับมอเตอร์

รูปที่ 2.3 (ข) เป็นรูปหลังการปรับปรุงตัวประกอบกำลังแล้ว โดยใช้ตัวเก็บประจุ (C) เป็นตัวจ่ายกระแสเสรีแอกทีฟให้กับมอเตอร์ทั้งหมด เรียกว่าปรับปรุงตัวประกอบกำลังเป็น 100 % ในกรณีนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายเฉพาะกระแสจริง 80 แอมแปร์เท่านั้น ทำให้ลดการจ่ายกระแสลงไปถึง 20 % กระแสส่วนที่ลดลงไปนี้แหล่งจ่ายสามารถนำไปจ่ายให้กับโหลดอื่นได้

2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

การปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นจะต้องใช้อุปกรณ์ช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้ากับวงจรนั้น แต่จะใช้อุปกรณ์ชนิดใดช่วยจ่ายกำลังดังกล่าวจะต้องทราบว่าตัวประกอบกำลังของระบบนั้นเป็นชนิดใดเสียก่อน เช่น ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่มีโหลดปลายสายต่ำๆ จะทำให้กระแสอัดประจุ (Charging Current) ของสาย ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังของสายกลายเป็นชนิดนำหน้าและแรงดันปลายสายจะสูงมาก ในกรณีนี้จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่เรียกว่า รีแอกแตนซ์ขนาน (Shunt Reactor) ต่อคร่อมที่ปลายสาย จึงจะช่วยลดแรงดันลงได้ แต่โดยทั่วไปแล้วตัวประกอบกำลังของโหลดเกือบทั้งหมดจะเป็นชนิดล่าหลัง ดังนั้นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงต้องใช้ตัวเก็บประจุ (C) หรืออุปกรณ์อื่นที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุเช่น ซิงโครนสมอเตอร์ เป็นตัวช่วยจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้

ตามปกติการปรับปรุงตัวประกอบกำลังนิยมใช้ตัวเก็บประจุต่อเข้ากับวงจรมากที่สุด เพราะมีราคาค่อนข้างถูก และเกือบจะไม่ต้องบำรุงรักษาเลย เพราะไม่มีส่วนเคลื่อนไหว และประการสำคัญคือมีกำลังสูญเสียในตัวเองต่ำมาก ในปัจจุบันสามารถผลิตตัวเก็บประจุ (C) ให้มีกำลังสูญเสียต่ำกว่า 0.5 W/kVAR ได้ อย่างไรก็ตาม บางกรณีการปรับปรุงตัวประกอบกำลังโดยใช้ซิงโครนสมอเตอร์ช่วยก็อาจเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ดำเนินอยู่ ดังนั้นการตัดสินใจเลือกใช้อุปกรณ์ชนิดใดเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจึงควรศึกษาให้รอบคอบเสียก่อน

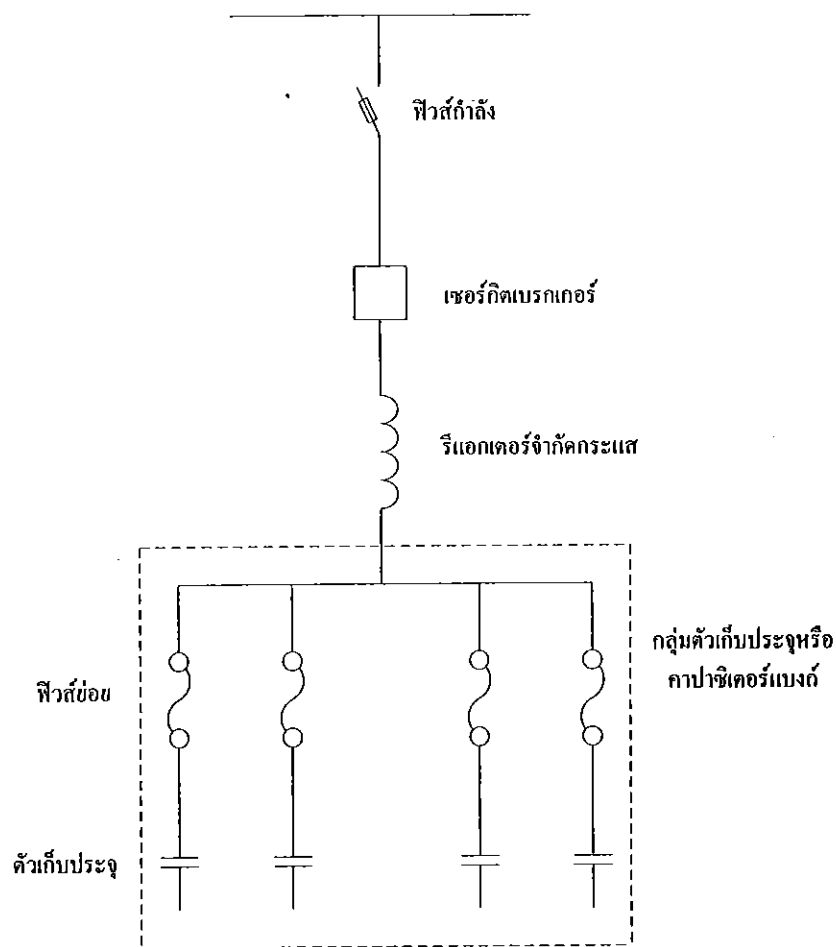
ตัวเก็บประจุ

คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลังชนิดล่าหลังให้มีค่าสูงขึ้น โดยตัวของมันเองมีคุณสมบัติเป็นตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้า ตัวเก็บประจุมีหลายชนิด ส่วนใหญ่จะเรียกชื่อตามชนิดของไดอิเล็กตริกที่ใช้เป็นฉนวน ตัวเก็บประจุมีหลายขนาด ถ้าเป็นขนาดเล็กจะบอกพิกัดเป็นไมโครฟารัด (μF) แต่ถ้าเป็นขนาดใหญ่จะบอกพิกัดเป็นกิโลวาร์ (kVAR) และกำกับด้วยขนาดแรงดันใช้งาน ตามปกติผู้ผลิตนิยมผลิตเพื่อใช้กับแรงดัน 400 โวลต์ มีขนาดตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200 จนถึง 300 กิโลวาร์

ในกรณีที่ต้องการขนาดสูงกว่าพิกัดที่ผลิตได้ จะใช้วิธีการนำเอาตัวเก็บประจุหลายๆตัวต่อขนานกันและบรรจุอยู่ในภาชนะเดียวกัน โดยเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่า กลุ่มตัวเก็บประจุหรือคาร์ปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor Bank) นอกจากนี้เมื่อต้องการต่อใช้งานที่แรงดันสูง จะต่ออันดับกันหลายๆตัวจนสามารถทนแรงดันนั้นได้ เหตุที่ไม่นิยมผลิตตัวเก็บประจุขนาดใหญ่หลายๆ และทนแรงดันได้สูงๆ เป็นเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมประกอบกัน

ในการต่อตัวเก็บประจุเพื่อใช้งานทั้งตัวเก็บประจุชนิดตัวเดียวและกลุ่มตัวเก็บประจุหรือคาร์ปาซิเตอร์แบงก์ จะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันและตัดตอนร่วมอยู่ด้วย เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุ และเพื่อความสะดวกในการทำงาน อุปกรณ์ที่จะต้องติดตั้งดังกล่าวได้แก่

1. ฟิวส์กำลัง (Power Fuse) ใช้เป็นตัวป้องกันการลัดวงจรที่จะเกิดขึ้นภายในกลุ่มตัวเก็บประจุทั้งหมด
2. เซอร์คิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ใช้เป็นตัวป้องกันกระแสไหลเกินพิกัด กระแสลัดวงจร แรงดันเกินและไม่สมดุลของกลุ่มตัวเก็บประจุ โดยมีรีเลย์เป็นตัวสั่งตัด (Trip) นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวสับหรือปลดกลุ่มตัวเก็บประจุเข้าหรือออกจากการใช้งานอีกด้วย
3. รีแอคเตอร์จำกัดกระแส (Current Limiting Reactor) ใช้จำกัดกระแสกระชอก (Inrush Current) ในขณะที่สับสวิตช์เพื่อต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร
4. ฟิวส์ย่อย (Unit Fuse) ใช้เป็นตัวป้องกันกระแสลัดวงจรภายในตัวเก็บประจุย่อย



รูปที่ 2.4 แสดงการต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ [1].

รูปที่ 2.4 เป็นตัวอย่างการต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ 22 กิโลโวลต์ ถ้าเป็นตัวเก็บประจุนิตตัวเดียวที่ใช้กับระบบแรงดันต่ำจะมีอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ตัดตอนเฉพาะฟิวส์และสวิตช์ปลดวงจรเท่านั้น

ชิงโครนัสมอเตอร์

ถ้าทำงานตามปกติก็จะมีคุณสมบัติเหมือนโหลดที่มีตัวประกอบกำลังชนิดล่าหลัง แต่ชิงโครนัสมอเตอร์มีคุณสมบัติพิเศษประจำตัวคือ ถ้าปรับให้กระแสกระตุ้นไหลเกินปกติ (Over-Excited) ก็จะมีคุณสมบัติเหมือนตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้าหรือตัวเก็บประจุได้ จึงเรียกมอเตอร์ที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า ชิงโครนัสคอนเดนเซอร์

ชิงโครนัสคอนเดนเซอร์มีข้อได้เปรียบตัวเก็บประจุอยู่บ้างเหมือนกันคือ สามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังได้ต่อเนื่อง โดยการปรับกระแสกระตุ้น ถ้าจะใช้ชิงโครนัสคอนเดนเซอร์เป็นอุปกรณ์ปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบ มักจะให้มันหมุนตัวเปล่านานกว่าหมุนขั้วโหลด ทั้งนี้เพื่อให้จ่ายกระแสรีแอกทีฟได้สูง แต่ในกรณีที่จำเป็นจะให้มันช่วยขั้วโหลดพร้อมกับปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไปด้วยก็ได้แต่จะให้ผลดีน้อยกว่า

อย่างไรก็ตามชิงโครนัสคอนเดนเซอร์ก็มีข้อเสียเปรียบตัวเก็บประจุเช่นเดียวกัน พอสรุปได้ดังนี้คือ

1. มีราคาแพงกว่าเมื่อเปรียบเทียบขณะจ่ายที่กำลังรีแอกทีฟเท่าๆกัน
2. ถ้าแหล่งจ่ายถูกตัดกระแสชั่วคราว ชิงโครนัสคอนเดนเซอร์จะหลุดออกจากสภาพชิงโครไนซ์และจะต้องเริ่มเดินเครื่องใหม่
3. ถ้าเกิดฟอลต์ (Fault) ในระบบ ชิงโครนัสคอนเดนเซอร์จะเป็นตัวจ่ายกระแสฟอลต์ให้กับระบบด้วย ทำให้ฟอลต์รุนแรงขึ้น

เนื่องจากชิงโครนัสมอเตอร์มีข้อเสียเปรียบมากกว่าตัวเก็บประจุ ดังนั้นจึงไม่น่าสงสัยเลยว่าทำไมการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงนิยมใช้เฉพาะตัวเก็บประจุเท่านั้น

สำหรับรูปแบบของระบบสายส่งไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสายส่งแบบกลาง (Medium Length) และระบบสายส่งแบบยาว (Long Length) สามารถที่จะทำการปรับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้านั้นๆ ได้โดยวิธีการที่เรียกว่า การชดเชยค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Compensation) การชดเชยค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟนี้ สามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุกรมและในรูปแบบขนาน การชดเชยค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบอนุกรม หรือ Series Compensation นี้ จะทำได้โดยการนำเอาชุดของคาปาซิเตอร์เข้าไปต่ออนุกรมอยู่ในสายส่งตัวนำในแต่ละเฟสของระบบสายส่ง ส่วนการชดเชยค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบขนาน หรือ Shunt Compensation นี้ จะทำได้โดยการนำค่าอินดักทีฟไปต่ออยู่ระหว่างสายส่ง (Line) กับนิวทรัล (Neutral) เพื่อที่จะใช้ลดค่า Shunt Susceptance (B_c) บางส่วนหรือลดค่า B_c ของสายส่งไฟฟ้าให้หมดไป ซึ่งค่า Shunt Susceptance นี้ จะเกิดขึ้นมากในระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูง ซึ่งการทำเช่นนี้เป็นสิ่งจำเป็นมากในระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูง และในขณะที่ปลายสายส่ง (Receiving - End) นั้นๆมีโหลดต่ออยู่น้อย (Light Load) เพราะฉะนั้นเมื่อที่ปลายสายส่ง (Receiving - End) มีโหลดต่ออยู่น้อย ก็จะเป็นเหตุที่ทำให้ค่าแรงเคลื่อนมีค่าสูงเพิ่มมากขึ้นกว่าค่าแรงเคลื่อนที่ทำงานปกติ (V_N) ได้

การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม (Series Compensation) จะเป็นตัวที่ช่วยลดค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่ในสายส่ง (Line) ลง เพราะค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่ในสายส่ง (Line) เหล่านี้ จะเป็นต้นเหตุของการเกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่ง (Voltage Drop) และค่านี้จะเป็นค่าแฟคเตอร์ที่สำคัญมากที่สุดที่จะยินยอมให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุด (Maximum Power) ไหลผ่านระบบสายส่งนั้นๆ ไปได้ เพื่อที่จะทำให้เข้าใจผลของค่าอิมพีแดนซ์ (Series Impedance) ต่อการส่งผ่านค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากต้นสายส่ง (Sending - End) ไปยังปลายสายส่ง (Receiving-End) ได้เป็นอย่างดีนั้นให้ดูสมการ (2.18)

$$P_{R,max} = \frac{|V_s| \cdot |V_R|}{|B|} - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.18) จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะสามารถส่งผ่านระบบสายส่งไฟฟ้านั้นๆ ไปได้จะขึ้นอยู่กับส่วนกลับของค่าคงที่ของวงจร (B) ซึ่งค่า B นี้ จะเท่ากับค่า Z ถ้าหากว่าวงจรสมมูลของสายส่งไฟฟ้านั้นๆ เป็นแบบ Nominal π จะมีค่าเท่ากับ $Z(\sinh \gamma l) / \gamma l$

ในการคำนวณคิดหาค่าขนาดของรีแอกแตนซ์ของตัวชดเชยคาปาซิเตอร์ (X_C) ที่จะนำมาใช้ในการต่ออนุกรมอยู่ในวงจรมันจะขึ้นอยู่กับค่าของอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (X_L) ทั้งหมดที่มีอยู่ในสายส่งไฟฟ้า (Line) นั้นๆ ซึ่งเราจะใช้คำว่า Compensation Factor ซึ่งค่านี้จะถูกนิยามดังนี้

$$\text{Compensation Factor} = \frac{X_C}{X_L} \quad (2.19)$$

เมื่อ X_C = ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของชดเชยคาปาซิเตอร์ที่จะนำมาต่ออนุกรมต่อเฟส

X_L = ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ทั้งหมดของสายส่งไฟฟ้าต่อเฟส

2.4.2 การแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของสายส่ง

การแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ทำได้หลายวิธี เช่น

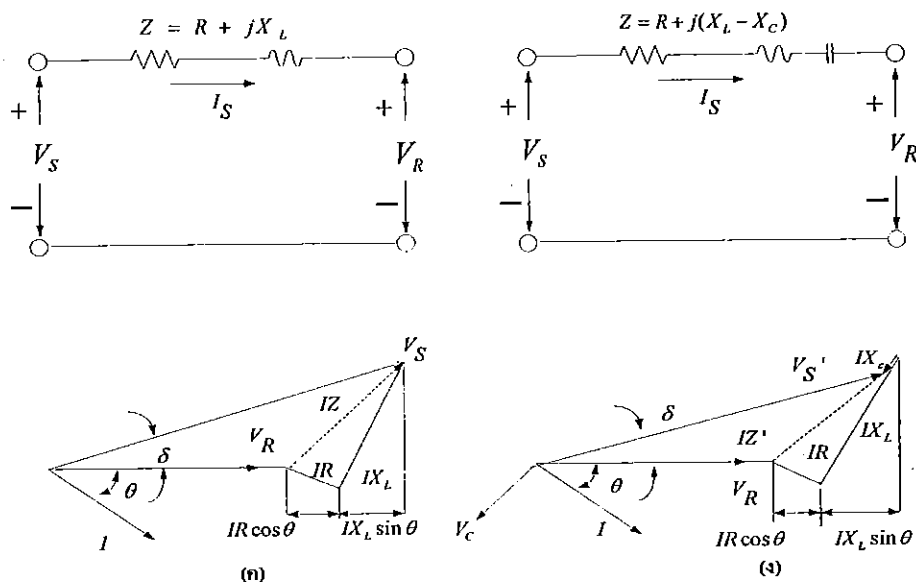
การต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม (Series Capacitor)

Series Capacitor คือ คาปาซิเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับสายส่ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อชดเชย (Compensate) ค่า X_L ที่มีอยู่ในสายส่งนั้นๆ ซึ่งลักษณะการต่อและค่ามุมต่างเฟส (Phase Diagram) แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม จะให้ข้อดีดังต่อไปนี้

1. ในกรณีที่โหลดมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ และวงจรสายส่งมีค่า X_L สูง จะทำให้ค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่งมีมาก ดังนั้นการลดแรงเคลื่อนตกคร่อมที่มีอยู่ในสายส่ง สามารถทำได้โดยการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม เพราะค่าคาปาซิแตนซ์จะไปชดเชยกับ X_L ของสายส่ง ดังนั้นสถานะดังกล่าวการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม (Series Capacitor) จะให้ผลดีกว่าการต่อแบบขนาน (Shunt) ที่มีค่า kVAR ของ C เดียวกัน

2. คาปาซิเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรม จะสามารถลดแรงเคลื่อนตกคร่อมภายในสายได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ปลายสายส่ง (Receiving - End Power Factor) และวงจรอื่นๆ การต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมนี้จะไม่มีผลต่อ I^2R Losses แต่จะลดผลของ I^2X_L Losses ในสายส่งเท่านั้น

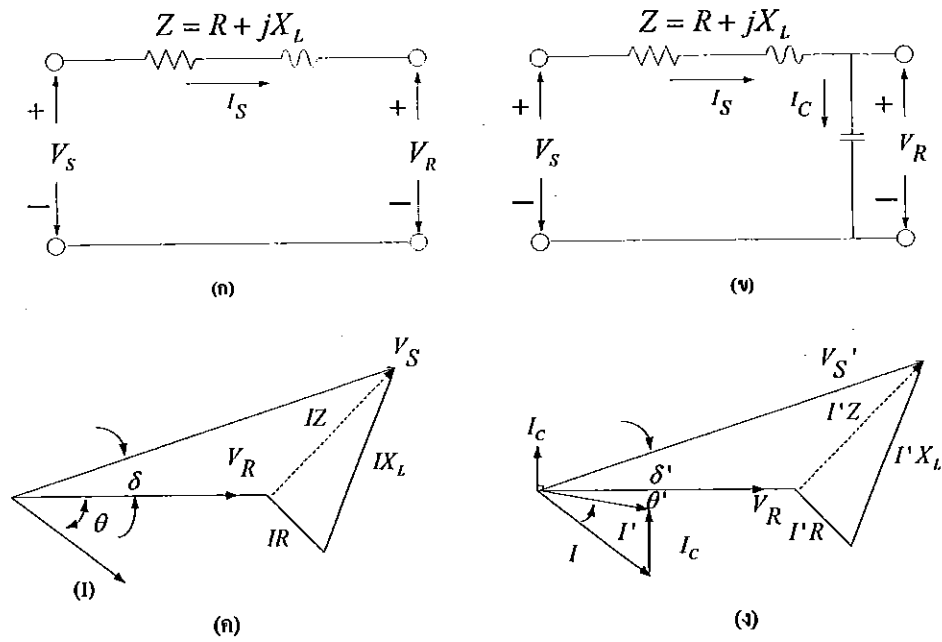
3. องค์ประกอบของค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมจะถูกกำจัดโดยอัตโนมัติ เนื่องมาจากค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมในตัวคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม



รูปที่ 2.5 แสดงการเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนของสายส่งที่มี Power Factor เป็นแบบด้าหลัง โดย (ก) และ (ค) ไม่ต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมส่วน (ข) และ (ง) ต่อคาปาซิเตอร์อนุกรม [3].

การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน (Shunt Capacitor)

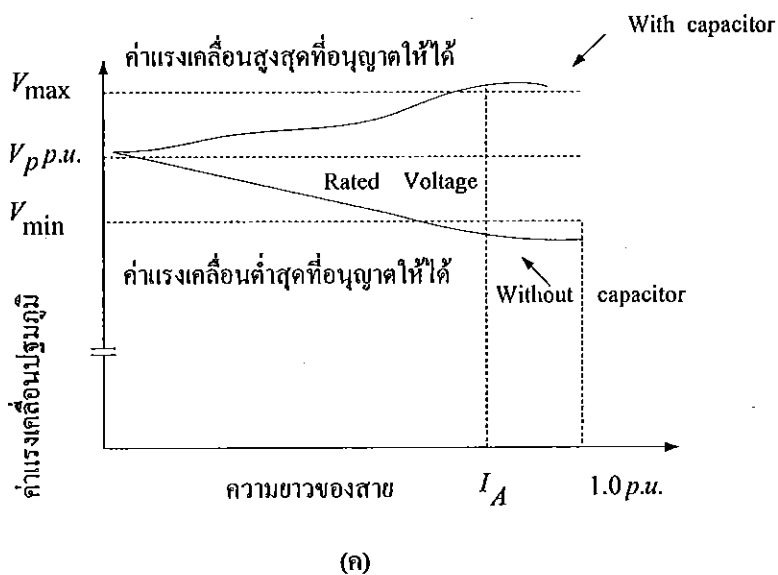
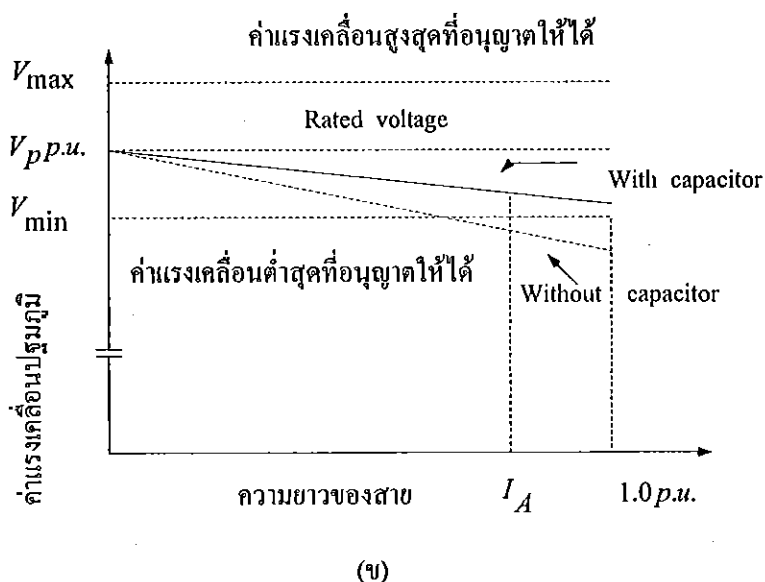
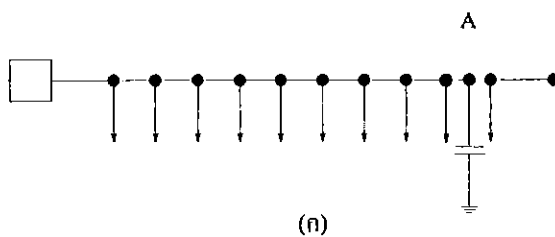
การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน (Shunt Capacitor) คือ คาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานกับสาย ซึ่งใช้มากในระบบไฟฟ้าย่อยโดยการต่อ Shunt Capacitor นี้จะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Power) ให้แก่โหลดพวก L หรือ Inductive Load ซึ่งการทำงานคล้ายกับการทำงานของ Synchronous Generator ที่ทำการต่อ Over-Excited โดยลักษณะการต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนของสายส่งที่มี Power Factor เป็นแบบล้าหลัง โดย (ก) และ (ค) ไม่ต่อ Shunt Capacitor ส่วน (ข) และ (ง) ต่อ Shunt Capacitor [3].

การต่อ Shunt Capacitor ในระบบไฟฟ้าให้ผลดังนี้

1. สามารถมั่นใจได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าอินดักทีฟ (kVAR) ไปยังโหลด จะต้องมียกเว้นค่าไม่เกินความสามารถของแหล่งกำเนิดที่จะจ่ายได้
2. สามารถลดขนาดกำลังสำรอง (Spare MVA Capacity) ของระบบไฟฟ้าที่ต้องมีตัวเจนเนอเรเตอร์อื่นๆที่เพื่อสำรองไว้ให้มีขนาดลดลงได้
3. ลดขนาดของกระแสที่จะจ่ายให้โหลดให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power Losses) ที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลง
4. ทำให้ Voltage Regulation ดีขึ้น



รูปที่ 2.7 แสดงผลของการต่อคาปาซิเตอร์แบบคงที่ในสายส่ง

- (ก) สายส่งที่มีการกระจายภาระไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ
- (ข) ในกรณีที่ภาระไฟฟ้ามีค่ามาก
- (ค) ในกรณีที่ภาระไฟฟ้ามีค่าน้อย [3].

เมื่อสายส่งที่มีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรมหรือไม่มีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งไปยังภาระไฟฟ้าตามที่ต้องการ ข้อควรระวังก็คือ สภาพของการทำงานของสายส่งในขณะที่มีโหลดน้อย หรือในตอนที่ไม่มีภาระไฟฟ้า (No-Load) ค่ากระแสไฟฟ้าประจุ (Charging Current) ที่เกิดขึ้นจะเป็นแอมป์เตอร์สำคัญในการนำมาพิจารณา จะได้ว่า

$$I_{chg} = B_c |V| \quad (2.20)$$

ในที่นี้ B_c = ค่า Capacitive Susceptance ทั้งหมดของสายส่ง

$|V|$ = ค่าแรงเคลื่อนที่ทำงานปกติกับนิวทรัล

แต่การหาค่ากระแสประจุ I_{chg} นี้ จะเป็นการคำนวณที่ไม่ต้องเที่ยงตรงนักเพราะว่าค่าแรงเคลื่อน $|V|$ มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดความยาวของสายส่งนั่นเอง ถ้าทำการต่ออินดักเตอร์ (Line) ไปยังนิวทรัลทุกๆ จุดตามความยาวของสายส่ง ก็จะทำให้ได้ค่า B_L (Total Inductive Susceptance) ของสายส่งนั้นๆ ได้เช่นเดียวกัน การคำนวณสามารถหากระแสไฟฟ้าประจุ (Charging current) ได้ดังสมการ

$$I_{chg} = (B_c - B_L) |V| = B_c \left(1 - \frac{B_L}{B_c} \right) |V| \quad (2.21)$$

จากสูตรในสมการ (2.21) จะเห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าประจุ (Charging Current) จะมีค่าลดลงโดยค่าอัตราส่วน (Shunt Compensation Factor) ก็คือ B_L / B_c

ข้อดีของการชดเชยแบบขนาน (Shunt Compensation) อีกประการหนึ่งก็คือ การลดลงของค่าแรงเคลื่อนที่ปลายทาง (Receiving-End Voltage) ของสายส่ง ซึ่งในสายส่งแรงเคลื่อนสูงที่มีความยาวมากๆ นั้น ค่าแรงเคลื่อนที่ปลายทาง (V_R) นั้น มีแนวโน้มที่จะมีค่าขนาดสูงมากกว่าเมื่อตอนไม่มีภาระไฟฟ้าจากสมการที่ว่า

$$\text{Percent regulation} = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (2.22)$$

โดยที่ $V_{R,NL}$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านปลายสายส่งต่อเฟสขณะไม่มีโหลด

$V_{R,FL}$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านปลายสายส่งต่อเฟสขณะจ่ายโหลดเต็มที่

จากสูตรของสมการที่ว่า

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.23)$$

เมื่อไม่มีโหลดต่อ (No-Load) นั้น $I_R = 0$

$$V_S = AV_R$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$A = V_S / V_R$$

หรือ

$$V_{R,NL} = \frac{V_S}{A} \quad (2.24)$$

โดยที่ V_S คือ แรงดันด้านต้นสาย (Sending End) ต่อเฟสหรือแรงดันที่เฟสด้านต้นสาย

A, B คือ ค่าคงที่ของวงจร

V_R คือ แรงดันด้านปลายสาย (Receiving End) ต่อเฟสหรือแรงดันที่เฟสด้านปลายสาย

I_R คือ กระแสด้านปลายสาย (Receiving End) ต่อเฟสหรือกระแสที่เฟสด้านปลายสาย

ดังนั้น เมื่อไม่มีโหลดหรือไม่มี Shunt Capacitance แล้ว ค่า $A = 1$ แต่ในระบบสายส่งแบบที่มีความยาวปานกลาง (Medium Length Line) และแบบยาว (Long Line) ถ้าหากว่าสายส่งมีค่าคาปาซิเตอร์อยู่ก็จะทำให้ค่าของ A ลดลง ดังนั้น การลดลงของค่า Shunt Susceptance ไปยังค่า $B_C - B_L$ สามารถที่จะกำหนดขนาดการเพิ่มขึ้นของค่าแรงเคลื่อนที่ไม่มีโหลด (No-load Voltage) ที่ปลายของสายส่งเพราะตัว Shunt Inductor จะทำหน้าที่เป็นโหลดแทน

ในการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งแบบอนุกรมและขนาน (Series and Shunt Compensation) ไปตามความยาวของสายส่งนี้ ก็จะส่งผลทำให้สายส่งสามารถที่จะส่งค่ากำลังไฟฟ้าจำนวนมากๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและอยู่ภายใต้ค่าขนาดแรงเคลื่อนที่ต้องการ สำหรับสายส่งแบบอุดมคติแล้ว ตัวคาปาซิเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรมและขนานควรจะถูกติดตั้งไปตามสายส่งเป็น

14995727

ช่วงๆ ไป โดยที่ตัว Series Capacitor สามารถที่จะ By Pass หรือ Shunt Inductor สามารถที่จะปิด
สวิตช์ตัดออกไปได้ถ้าต้องการ

น/ส.

ศ 782 ก

2551

2.5 การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้อุปกรณ์ในตระกูล Flexible AC

Transmission Systems

ปัจจุบันแนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้ามีอัตราขยายตัวสูงขึ้น ส่งผลให้ต้องมีการขยาย
กำลังการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และปรับปรุงระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้มีความมั่นคง มี
ประสิทธิภาพ และเพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า แต่หากไม่คำนึงถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า
(Power Quality) อาจทำให้ประสบปัญหาทางด้านแรงดัน เช่น แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage Sag)
แรงดันกระเพื่อม (Voltage Swell) แรงดันตก (Under Voltage) หรือ แรงดันเกิน (Over Voltage)
ปัญหาเหล่านี้อาจนำมาซึ่งความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ภายใต้ข้อจำกัดทางด้านสิ่งแวดล้อม
และทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยไม่มีการสร้างระบบสายส่งขึ้นใหม่ จึงมีการคิดค้นวิธีการสร้าง
อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) มาประยุกต์ใช้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังที่
เรียกว่า Flexible AC Transmission Systems (FACTS)

Flexible AC Transmission System (FACTS) ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังกระแสสูง
สามารถควบคุมแรงดัน การไหลกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์
FACTS สามารถเชื่อมต่อได้หลายวิธีในสายส่ง เช่น อนุกรม ขนาน หรือผสม สำหรับอุปกรณ์ชดเชย
กำลังไฟฟ้า (Compensator) ตัวอย่างเช่น Static Var Compensator (SVC) ถูกเชื่อมต่อในลักษณะ
ขนาน Thyristor-Controlled Series Compensator (TCSC) ถูกเชื่อมต่อในลักษณะอนุกรม Unified
Power Flow Controller (UPFC) ถูกเชื่อมต่อในลักษณะผสม

อุปกรณ์ FACTS มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความจุการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของสายส่ง ซึ่ง
ยังคงรักษาระดับของเสถียรภาพดั้งเดิม หรือควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพทาง
แรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

2.5.1 Static Var Compensator (SVC)

หลักการควบคุมโดยไทรสเตอร์

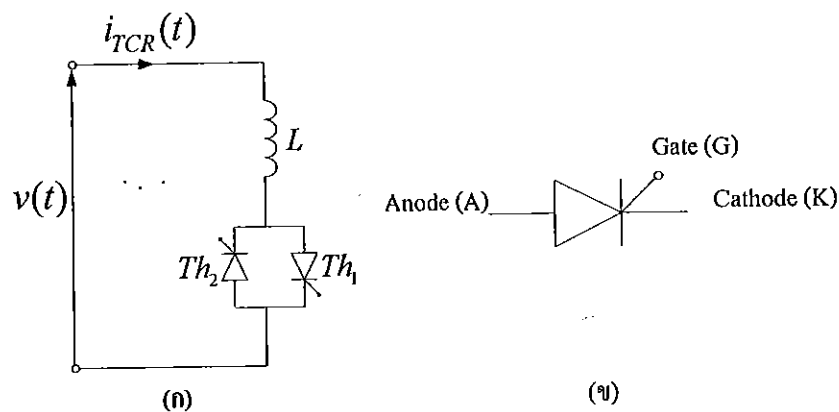
วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ไทรสเตอร์เป็นตัวควบคุมได้ถูกใช้อย่างกว้างขวาง และนำไป
ประยุกต์ใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1970 การใช้งานในระยะแรกใช้ในระบบส่ง
กระแสตรงแรงสูง (HVDC) สำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) โดยการ
ชดเชยแบบขนาน ซึ่งแอกเซฟแตนซ์ (Acceptance) เป็นตัวควบคุมค่าของอินดักเตอร์ (Inductor)
และค่าของคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ส่วนการชดเชยแบบอนุกรมที่มีไทรสเตอร์เป็นองค์ประกอบ ซึ่ง
การชดเชยดังกล่าวจะใช้ปรับเปลี่ยนระยะทางไฟฟ้า (Electrical Length) ได้แบบทันทีทันใด

ทดแทนการใช้คาปาซิเตอร์อนุกรมแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นการควบคุมในทางเครื่องกล (Mechanical) ในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า โดยใช้ไทรสเตอร์เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์คอยเปิด-ปิดวงจร เพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือของแหล่งจ่ายไปยังผู้ใช้ไฟ

ในส่วนนี้สนใจอุปกรณ์ 3 ตัวที่ใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุม อันได้แก่ Thyristor-Controlled Reactor (TCR), SVC และ TCSC คุณลักษณะการดำเนินการของแต่ละตัวที่ทำการศึกษาต่อไปนี้จะใช้การดำเนินการในสภาวะอยู่ตัว (Steady-State) เป็นหลัก

1. Thyristor-Controlled Reactor

ส่วนประกอบพื้นฐานของวงจร TCR แสดงดังรูปที่ 2.8 (ก) โดยใช้ไทรสเตอร์ 2 ตัวต่อขนานกันเป็นตัวควบคุม กำหนดสัญลักษณ์เป็น Th_1 และ Th_2 ซึ่งจะนำกระแสสลับกันในแต่ละครึ่งไซเคิลของความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้า ส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือรีแอคเตอร์ (Reactor) แบบเชิงเส้นของอินดักแตนซ์ (Inductance, L) สัญลักษณ์วงจรไทรสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.8 (ข)



รูปที่ 2.8 วงจรหลักของไทรสเตอร์ (ก) Thyristor-Controlled Reactor (TCR)
พื้นฐาน (ข) สัญลักษณ์วงจรของไทรสเตอร์ [4].

การทำงานของวงจรไทรสเตอร์ ทำได้โดยการควบคุมค่ารีแอคเตอร์แบบเชิงเส้น (Linear Reactor) ซึ่งจะไปควบคุมค่าซัสเซปแตนซ์ (Susceptance) อีกทีหนึ่ง ในช่วงที่เป็นอินดักแตนซ์ (Inductance) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมจุดชนวน (α) การดำเนินการ TCR ที่สภาวะอยู่ตัว (Steady-State) ในช่วงความถี่พื้นฐานที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Harmonic Distortion) ยกเว้นในสภาวะที่นำกระแสไฟฟ้าเต็มที

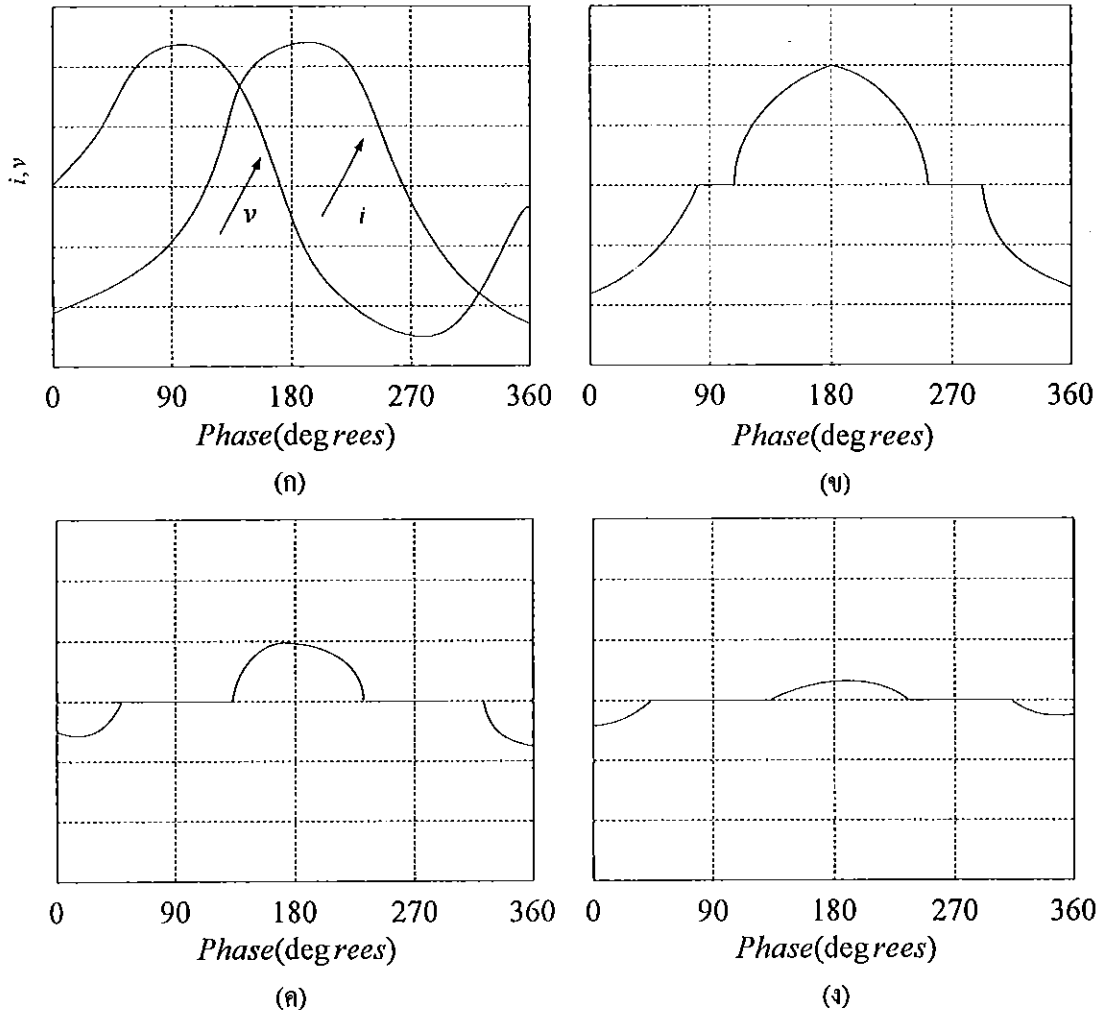
เริ่มแรกทำการพิจารณาสภาวะเมื่อไม่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Harmonic Distortion) ซึ่งสร้างขึ้นโดย TCR ในขณะที่ขาเกตของไทรสเตอร์นำกระแสไฟฟ้า ณ จุดสูงสุดของค่าแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้า รีแอคเตอร์ (Reactor) นำกระแสเต็มทีและไทรสเตอร์สามารถควบคุมการ

ลัดวงจร (Short-Circuit) ได้ โดยรีแอกเตอร์ (Reactor) มีค่าความต้านทาน ค่ากระแสไหลวนชอยดอล (Sinusoidal) และค่าอินดักทีฟ (Inductive) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ค่ากระแสไฟฟ้าจะล่าหลัง (Lagging) แรงดันไฟฟ้าอยู่เกือบ 90° ($\pi/2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งแสดงคาบของแรงดัน และกระแสที่ความถี่พื้นฐาน

กล่าวได้ว่าสถานะนี้สอดคล้องกับมุมจุดชนวน (α) ของ $\pi/2$ ค่าของกระแส ณ จุดตัดที่ศูนย์ (Zero-Crossing) ถูกวัดเทียบกับค่าแรงดัน ณ จุดตัดที่ศูนย์ (Zero-Crossing) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมจุดชนวน (α) และมุมนำไฟฟ้า (σ) กำหนดให้โดย

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.25)$$

การนำไฟฟ้าเพียงบางส่วนเป็นผลมาจากมุมจุดชนวน (α) ในช่วงพิสัย $\pi/2 < \alpha < \pi$ ในหน่วยเรเดียน (Radian) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข)-2.9 (ง) เมื่อกระแสไฟฟ้าของ TCR เป็นฟังก์ชันของมุมจุดชนวน (α)



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นกระแสใน Thyristor-Controlled Reactor (TCR) พื้นฐาน (ก) $\alpha = 90^\circ$,
 $\sigma = 180^\circ$ (ข) $\alpha = 100^\circ$, $\sigma = 160^\circ$ (ค) $\alpha = 130^\circ$, $\sigma = 100^\circ$ (ง) $\alpha = 150^\circ$,
 $\sigma = 60^\circ$ เพื่อความสะดวก กำหนดมุมในหน่วยองศา [4].

หมายเหตุ : i = กระแส v = แรงดัน α = มุมจุดชนวน σ = มุมนำกระแส

ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวน (α) เกินกว่าค่า $\pi/2$ เป็นสาเหตุทำให้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของ TCR มีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ซอซอดอล (Nonsinusoidal) และมีการลดขนาดองค์ประกอบที่ความถี่พื้นฐานของมัน ตามการเพิ่มของค่ารีแอกเตอร์ (Reactor) ของอินดักแตนซ์ (Inductance, L) ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการดึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) จากโครงข่าย ณ จุดที่ทำการเชื่อมต่อ

2. Static VAR Compensator

ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด SVC ประกอบด้วย TCR ต่อขนานกับกลุ่มของตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank) จากแนวความคิดการดำเนินการ SVC จะประพฤติตัวเหมือนกับรีแอกแตนซ์ที่สามารถปรับค่าได้ (Variable Reactance) โดยถูกเชื่อมต่อแบบขนาน ซึ่งไม่เพียงแต่สร้างกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) แต่ยังสามารถดูดกลืนกำลังไฟฟ้าดังกล่าวได้อีกด้วยเพื่อที่จะควบคุมขนาดแรงดัน ณ จุดที่ทำการเชื่อมต่อในโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดย SVC ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการจัดให้กำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบรวดเร็ว (Fast Reactive Power) และสนับสนุนการปรับเปลี่ยนขนาดแรงดัน ความเร็วในการตอบสนองของไทรสเตอร์ภายในอุปกรณ์ SVC เกือบจะทันทีทันใด ซึ่งถูกควบคุมโดยมุมจุดชนวน

การสร้างแบบจำลองของ TCR เพียง 1 สาขา ได้ดำเนินการไปแล้วในหัวข้อที่ 1. (Thyristor-Controlled Reactor) และสิ่งที่ต้องศึกษาต่อไปคือกลุ่มของตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank) ซึ่งแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ของสาขาทั้งสองของ SVC จะนำมารวมกันโดยตรงไปตรงมา

แอดมิตแตนซ์โหนด (Nodal Admittance) ของกลุ่มตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank) ในพิกัดเฟส (Phase Coordinate) อาจจะถูกแสดงด้วยการแสดงของจุดสตาร์ (Star Point) ซึ่งไม่ใช่กราวด์ (Ground) อย่างไรก็ตาม มีอีกทางเลือกหนึ่งที่ดีกว่านั้นคือการดำเนินการโดยใช้วิธีการลดอันดับ (Kron Reduction) ซึ่งจะได้รูปแบบเทียบเท่าที่ลดลง เนื่องจากมีเพียงพารามิเตอร์ของเฟส a, b และ c ซึ่งถูกแสดงไว้อย่างชัดเจนแล้วนั้น

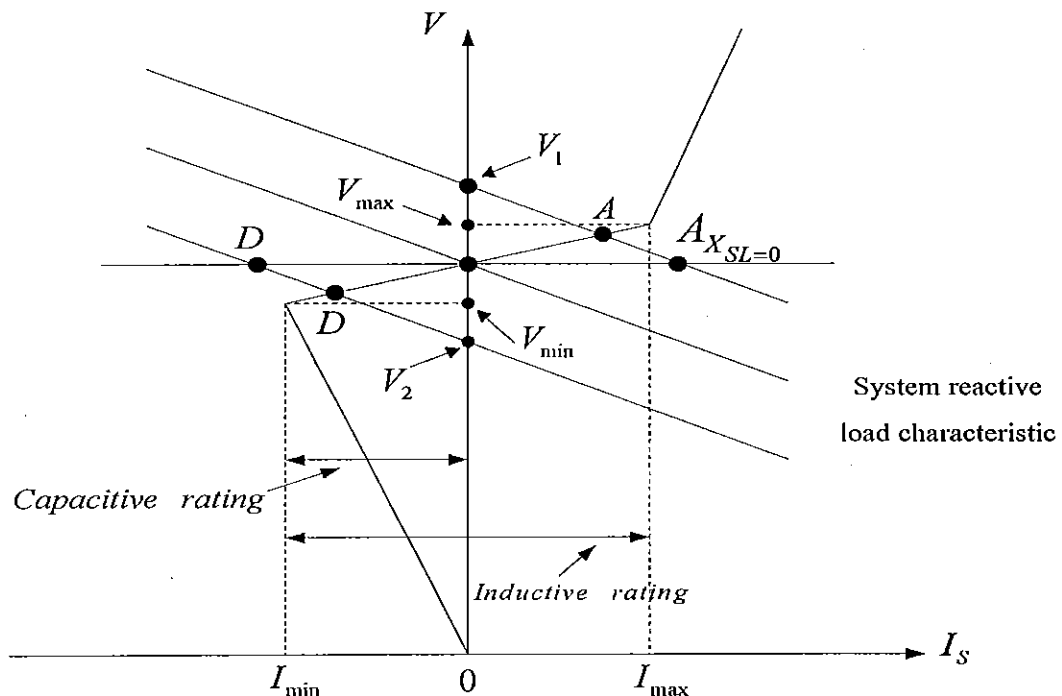
Static VAR Compensator ในระบบ 1 เฟส

รูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าของ SVC แบบขั้นธรรมดาและแบบขั้นสูงจะแสดงให้เห็นในหัวข้อนี้ ซึ่งในการแสดงรูปแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับรูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าของ SVC แบบขั้นสูงจะต่างจากแบบขั้นธรรมดา แต่ยังลงยึดหลักการเดียวกัน นั่นคือชัสนพแดนซ์ขนานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Shunt Susceptance) ในกรณีต่อมา ตัวแปรสถานะของ SVC จะถูกรวมเข้ากับขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่โหนดของโครงข่าย โดยอ้างอิงจากหน่วยเดียวกัน สำหรับโครงข่ายใดๆ การคำนวณรอบการทำซ้ำ (Iterative) จะใช้วิธีการคำนวณของนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson) ซึ่งการแสดงรูปแบบทั้ง 2 ในส่วนนี้ กล่าวคือรูปแบบชัสนพแดนซ์ขนานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Shunt Susceptance) และรูปแบบมุมจุดชนวน (Firing Angle) ทั้งนี้ หม้อแปลงแบบผสม (Compound) และรูปแบบของ SVC ให้ยึดตามมุมจุดชนวน (Firing Angle) ของ SVC นั้นเอง

1. รูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าแบบขั้นธรรมดา

รูปแบบของ SVC ในอดีตจะนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์การรักษาการไหลกำลังไฟฟ้าของ SVC ซึ่งเป็นตัวสร้างรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ (Inductive Reactance) โดยปริมาณรีแอกแตนซ์ (Reactance) จะเป็นตัวควบคุมคุณลักษณะแรงดันนั้นเอง

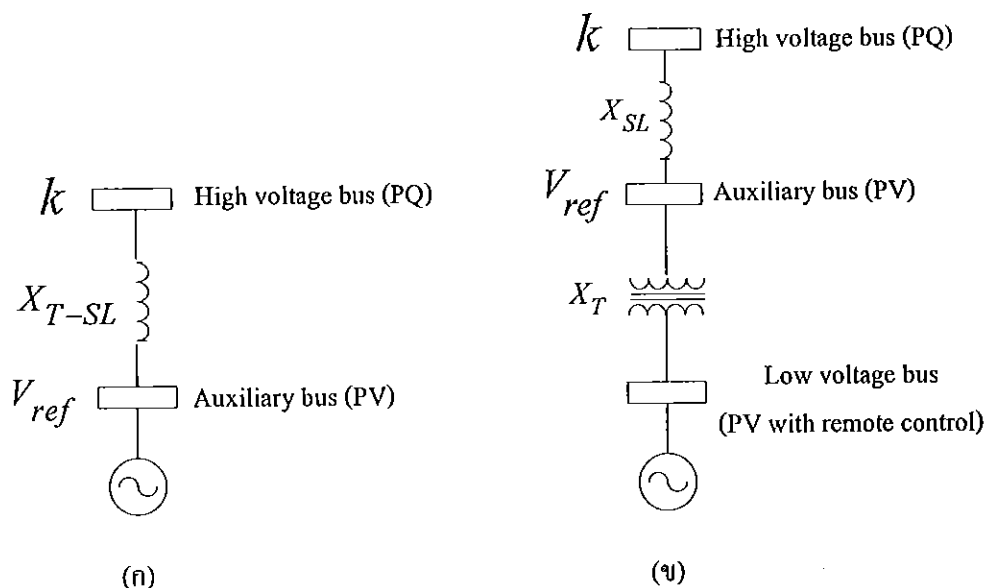
การแสดงอย่างง่าย โดยการสมมุติค่าความชันกราฟของ SVC เป็นศูนย์ ซึ่งการสันนิษฐานนี้อาจจะยอมรับได้ ถ้าหากการดำเนินการของ SVC นั้นเป็นระยะเวลานาน ภายในขอบเขตที่ได้ออกแบบไว้ แต่ก็ยังอาจจะเกิดความผิดพลาดจากข้อจำกัดบางประการของตัว SVC เอง ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเทียบกับคุณลักษณะขั้นสูงสุด เมื่อระบบดำเนินการภายใต้สภาวะที่ภาระทางไฟฟ้าต่ำๆ ถ้าค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกรบกวนซึ่งเป็นขีดจำกัดต่ำสุดของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเอง ซึ่งจุดดังกล่าวนี้คือ $A_{X_{SL}=0}$ อย่างไรก็ตาม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานได้ดีภายในขอบเขตดังกล่าว ถ้าค่าความชันของกราฟแรงดัน-กระแสของ SVC มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนไปถึงจุด A



รูปที่ 2.10 Static VAR Compensator และคุณลักษณะกระแส-แรงดันของระบบไฟฟ้า [4].

เหตุผลสำหรับการรวมกราฟความชันระหว่างกระแส-แรงดันของ SVC เพื่อใช้สำหรับพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยความชันสามารถแทนด้วยการเชื่อมต่อรูปแบบ SVC ที่บัสเสริม (Auxiliary Bus) เชื่อมต่อกับบัสแรงดันไฟฟ้าสูง (High-Voltage bus) โดยรีแอกแตนซ์อินดักทีฟ (Inductive Reactance) ประกอบด้วย รีแอกแตนซ์หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Reactance) และค่าความชันของกราฟ SVC ในระบบหน่วยเปอร์เซ็นต์ (per unit, p.u.) บนฐาน SVC โดยบัสเสริม (Auxiliary Bus) ถูกแทนด้วยบัสพีวี (PV Bus) และบัสแรงดันไฟฟ้าสูง (High-Voltage bus) ถูกแทนด้วยบัสพีคิว (PQ Bus) รูปแบบดังกล่าวแสดงแผนผังให้เห็นดังรูปที่ 2.11 (ก) มีอีก

ทางเลือกหนึ่งคือ การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากับ SVC อาจจะแสดงให้เห็นแบบชัดเจนดังรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.11 รูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าแบบชั้นธรรมดาของ static VAR compensator

(ก) การแสดงความชันและ (ข) การแสดงความชันและการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า [4].

ทั้งหมดนี้เป็นการแสดง SVC โดยตรง แต่สำหรับการดำเนินการที่นอกเหนือข้อจำกัด ดังเช่นในกรณีที่มีความจำเป็นต้องแสดง SVC ในรูปแบบของซัสเซปแตนซ์รีแอคทีฟแบบติดแน่น (Fixed Reactive Susceptance) กำหนดให้ โดย

$$B_{SVC} = \frac{-Q_{lim}}{V_{SVC}^2}, \quad (2.26)$$

เมื่อ V_{SVC} เป็นแรงดันอิสระใหม่เนื่องจากกำลังไฟฟารีแอคทีฟจำกัด (Reactive Power Limit, Q_{lim}) ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น

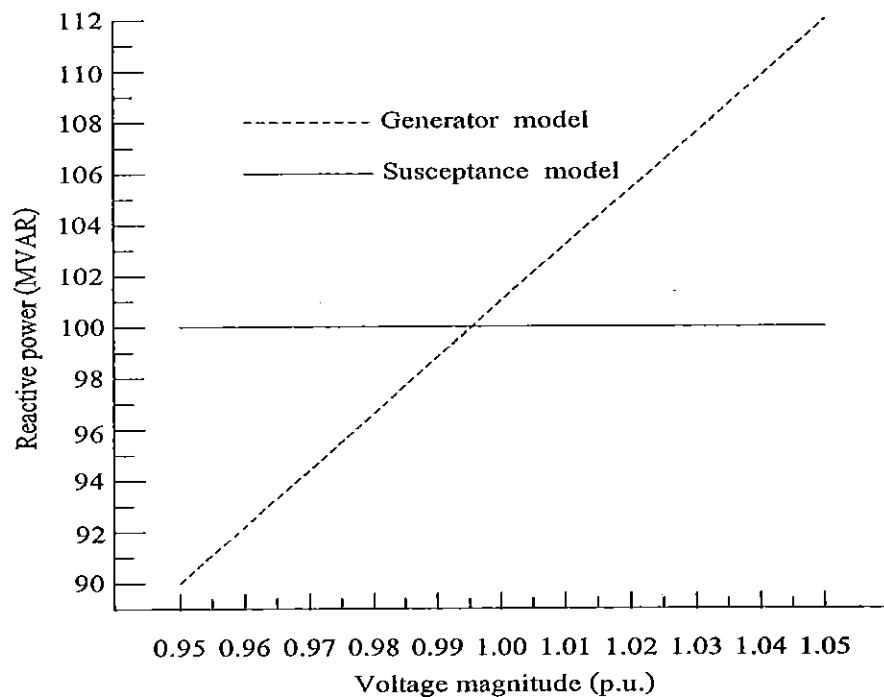
การแสดงผลลัพธ์ของการรวมซัสเซปแตนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator-Susceptance) ด้วยความถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อเสียในการแสดงรูปแบบทั้งสองจากการใช้จำนวนบัสที่แตกต่างกัน โดยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองหรือสามบัส ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในทางตรงกันข้ามซัสเซปแตนซ์ที่ติดแน่น (Fixed Susceptance) จะใช้เพียงหนึ่งบัส ในสมการการไหลกำลังไฟฟ้าของนิวตันราฟสัน (Newton Raphson) ความแตกต่างของจำนวนบัสที่แสดงสำหรับองค์ประกอบอุปกรณ์ติดตั้งทั้งหมดอาจนำไปสู่การสร้างเมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix)

และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของจาโคเบียน (Jacobian) ระหว่างการทำซ้ำ (Iterative) ซึ่งมีความจำเป็นในการตรวจสอบอย่างคร่าวๆ เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้อง แต่ถึงอย่างนั้น ควรจะนำ SVC กลับไปดำเนินการภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งแสดงออกมาในแต่ละรอบการทำซ้ำ (Iterative)

เป็นที่น่าสังเกตว่า การดำเนินการภายนอกข้อจำกัดนั้น รูปแบบของ SVC ต้องเป็นไปตามซัสเซปแตนซ์ (Susceptance) และไม่เป็นไปตามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตั้งไว้ที่ไวโอเลตลิมิต (Violated Limit, Q_{lim}) โดยไม่คำนึงถึงความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ เนื่องจากว่าปริมาณของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ถูกดึงโดย SVC ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าฟิกซ์ซัสเซปแตนซ์ (Fixed Susceptance, B_{fix}) และขนาดแรงดันไฟฟ้าโหนด (V_k) เนื่องจาก V_k เป็นฟังก์ชันในสถานะการดำเนินการของโครงข่าย จำนวนของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่ถูกดึงโดยฟิกซ์ซัสเซปแตนซ์ (Fixed Susceptance) ซึ่งรูปแบบจะแตกต่างจากกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่ถูกดึงโดยรูปแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นั่นคือ

$$Q_{lim} \neq -B_{fix} V_k^2. \quad (2.27)$$

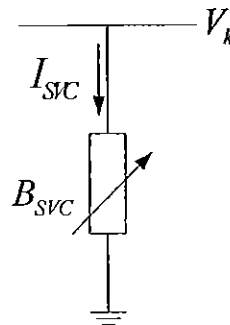
ณ จุดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟเอาท์พุท (Reactive Power Output) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งไว้ที่ 100 MVAR ซึ่งเป็นค่าคงที่และไม่ขึ้นกับค่าแรงดัน ผลจะเป็นดังรูป



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่ถูกดึงโดยรูปแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Model) และรูปแบบซัสเซปแตนซ์ (Susceptance Model) [4].

2. รูปแบบชั้สเชปแต่นช้ขนานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Shunt Susceptance)

ในทางปฏิบัติ SVC สามารถมองเป็นรีแอกแตนซ์ (Reactance) ที่สามารถปรับค่าได้ด้วยมุมจุดชนวน (Firing Angle) หรือรีแอกแตนซ์ (Reactance) อย่างใดอย่างหนึ่ง วงจรเทียบเท่าแสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งได้จากสมการกำลังไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นและสมการเชิงเส้นของ SVC โดยใช้วิธีการของนิวตันกราฟสัน (Newton's Method) .



รูปที่ 2.13 ชั้สเชปแต่นช้ขนานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Shunt Susceptance) [4].

จากรูปที่ 2.13 กระแสที่ถูกดึงโดย SVC คือ

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_k \quad (2.28)$$

โดย

$$B_{SVC} = B_C - B_{TCR} = \frac{1}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \right\}, \quad (2.29)$$

และ

$$\left. \begin{aligned} X_L &= \omega L, \\ X_C &= \frac{1}{\omega C}. \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

และกำลังไฟฟ้รีแอกคทีฟ (Reactive Power) ที่ถูกดึงโดย SVC และฉีดเข้าไปที่บัส k คือ

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \quad (2.31)$$

สมการเชิงเส้นจะเป็นดังสมการ (2.32) เมื่อชั้สเซปแดนซ์เทียบเท่า (Equivalent Susceptance, B_{SVC}) เป็นตัวแปรสถานะ

$$\Delta Q_{k,S}^{(i)} = Q_k^{(i)} (\Delta B_k / B_{SVC})^{(i)} \quad (2.32)$$

โดยที่ S คือ ชั้สเซปแดนซ์ขนาน (Shunt Susceptance)

ณ รอบการทำซ้ำ (Iteration) สุดท้าย (i) ชั้สเซปแดนซ์ขนานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Shunt Susceptance, B_{SVC}) เปลี่ยนเป็นค่าปัจจุบัน ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.33)

$$B_{SVC}^{(i)} = B_{SVC}^{(i-1)} + \left[\frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}} \right]^{(i)} B_{SVC}^{(i-1)} \quad (2.33)$$

การแทนชั้สเซปแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลง สำหรับชั้สเซปแดนซ์ของ SVC ทั้งหมด ซึ่งมีความจำเป็นในการรักษาขนาดของแรงดัน โทแคให้เป็ค่าเฉพาะค่าหนึ่ง

เนื่องจากระดับของการชดเชยสามารถคำนวณได้ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณมีความจำเป็นต้องใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative Solution) เนื่องจากชั้สเซปแดนซ์ของ SVC และมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

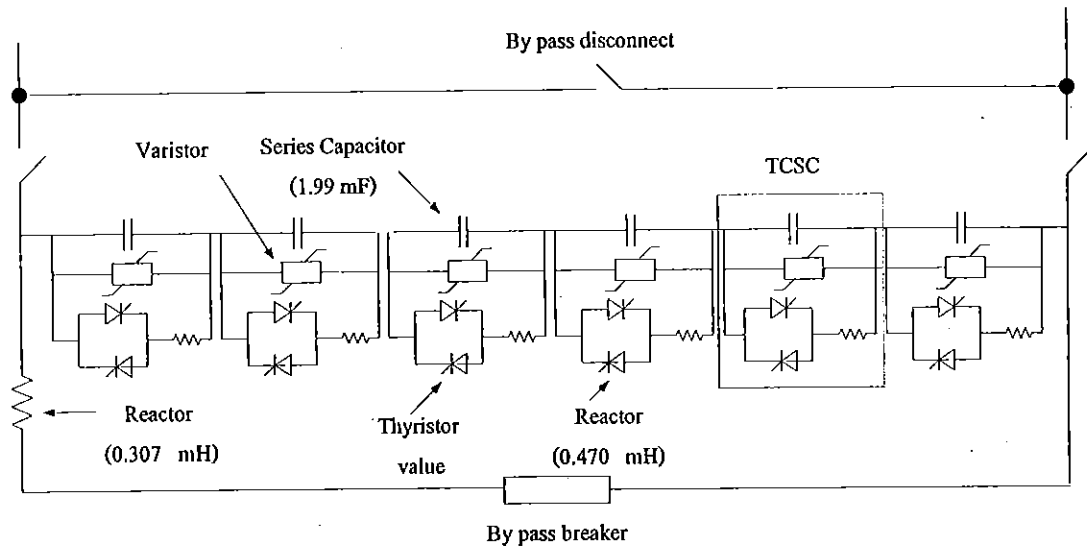
2.5.2 Thyristor-controlled Series Compensator (TCSC)

บทนำ

การชดเชยสายส่งโดยใช้ TCSC เป็นการเปลี่ยนแปลงระยะทางไฟฟ้า (Electrical Length) โดยคุณสมบัติของ TCSC สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) เพิ่มเสถียรภาพของระบบและมีประสิทธิภาพในการแดมป์แอสเอสอาร์ (Damping SSR) และการออสซิลเลชันกำลังไฟฟ้า (Oscillations Power)

วงจรถียบเท่าของ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)

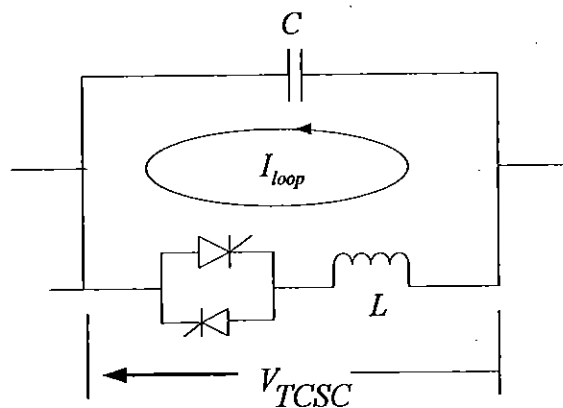
รูปแบบของ TCSC ประกอบด้วยไทรสเตอร์ (TCR) ขนานกับคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ซึ่งในการใช้งานจริงมีการนำ TCSC หลายๆตัวมาต่อเข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงรูปแบบของ TCSC ในระบบ 1 เฟส



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางกายภาพของ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) [4].

ในการดำเนินการที่สถานะความถี่พื้นฐาน มีการสูญเสียกระแสฮาร์มอนิกส์ให้กับที่ซีอาร์ (TCR) ซึ่งสร้างขึ้นโดยมุนาไทรสเตอร์ อย่างไรก็ตามจะตรงกันข้ามกับ SVC ซึ่งกระแสฮาร์โมนิกส์สร้างขึ้นโดยที่ซีอาร์ (TCR) ผ่านไปยังโครงข่ายของสายส่ง ในการใช้งาน TCSC กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ที่ซีอาร์ (TCR) ได้รับจะอยู่ภายใน TCSC เนื่องจากตัวคาปาซิเตอร์ (Capacitor) มีอิมพีแดนซ์ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์เทียบเท่าของโครงข่าย

สำหรับวัตถุประสงค์ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่ความถี่พื้นฐาน เมื่อพิจารณารูปแบบของ TCSC ที่ซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งประกอบด้วยที่ซีอาร์ (TCR) เทียบเท่า 1 ตัว ขนานกับคาปาซิเตอร์เทียบเท่า (Equivalent Capacitor) 1 ตัว สามารถแสดงแผนผังดังรูปที่ 2.15 โดยเสิร์จอารเรสเตอร์ (Surge Arrester) จะเกิดขึ้นในกระแสลูป ซึ่งไม่แสดงให้เห็นในกรณีนี้ แต่จะแสดงในกรณีที่ดำเนินการในสถานะอยู่ตัว (Steady-State)



รูปที่ 2.15 วงจรเทียบเท่าของ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) [4].

วงจรเทียบเท่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับรีแอกแตนซ์เทียบเท่า ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณเกิดของไทรสเตอร์

Thyristor – controlled Series Compensator ในระบบ 1 เฟส

ในการใช้งานโครงข่ายกระแสสลับ การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC เข้าไปส่งผลต่อรูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดที่ต่อ TCSC เข้าไปนั้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นต่อไป โดยยึดกรอบความคิดที่ว่า รูปแบบของ TCSC สามารถแทนได้ด้วยรีแอกแตนซ์อนุกรม (Series Reactance) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม (Series Reactance) ถูกปรับเปลี่ยนได้โดยอัตรโนมัต ซึ่งเป็นตัวจำกัดปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ที่ไหลผ่านตัวมันให้มีค่าเฉพาะค่าหนึ่ง นอกจากการใช้ประโยชน์จากรูปแบบของ TCSC โดยตรงแล้วยังใช้คุณลักษณะมุมจูนของรีแอกแตนซ์ (Reactance) ของ TCSC ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมุมจูนของ TCSC ถูกเลือกเป็นตัวแปรสถานะในการแก้ปัญหการไหลกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Method)

รูปแบบอิมพีแดนซ์อนุกรม (Series Impedance) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ต่อการไหลกำลังไฟฟ้า

การแสดงรูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าของ TCSC ในส่วนนี้ยึดกรอบความคิดที่ว่ารีแอกแตนซ์อนุกรม (Series Reactance) สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้โดยอัตรโนมัต ซึ่งจะเป็นตัวจำกัดการไหลกำลังไฟฟ้าผ่านสาขานั้นๆ ด้วยค่าเฉพาะค่าหนึ่ง โดยค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) สามารถคำนวณโดยใช้วิธีการของนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson) โดยค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance, X_{TCSC}) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) และรูปที่ 2.16 (ข) ซึ่งเป็นการแสดงรูปแบบของรีแอกแตนซ์เทียบเท่า (Equivalent Reactance) ที่ต่ออนุกรมทั้งหมดของ TCSC เมื่อดำเนินการในย่านอินดักทีฟ (Inductive Region) หรือย่านคาปาซิทีฟ (Capacitive Region) อย่างใดอย่างหนึ่ง



รูปที่ 2.16 วงจรเทียบเท่าของ Thyristor-Controlled Series Compensator (ก) การดำเนินการในย่านอินดักทีฟ (Inductive Region) และ (ข) การดำเนินการในย่านคาปาซิทีฟ (Capacitive Region) [4].

ทรานเฟอร์แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Transfer Admittance Matrix) ของการชดเชยแบบอนุกรมที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{kk} & jB_{km} \\ jB_{mk} & jB_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

สำหรับการดำเนินการในย่านอินดักทีฟ (Inductive Region)

$$\left. \begin{aligned} B_{kk} = B_{mm} &= -\frac{1}{X_{TCSC}}, \\ B_{km} = B_{mk} &= \frac{1}{X_{TCSC}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

และการดำเนินการในย่านคาปาซิทีฟ (Capacitive Region) สมการจะเป็นดังเช่นสมการ (2.35) เพียงแต่ทำการสลับที่สัญลักษณ์ของตัวห้อยเค (k) และเอ็ม (m)

สมการกำลังไฟฟ้าจริง (active power) และสมการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power) ที่บัสเค (k) คือ

$$P_k = V_k V_m B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m), \quad (2.36)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k V_m B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m), \quad (2.37)$$

สำหรับสมการกำลังไฟฟ้าที่บัสเอ็ม (m) สมการจะเป็นดังเช่นสมการ (2.36) และสมการ (2.37) เพียงแต่ทำการสลับที่สัญลักษณ์ของตัวห้อยเค (k) และเอ็ม (m)

โดยวิธีการของนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson) พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการดังกล่าวนี้มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม (Series Reactance) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม (Series Reactance) จะเป็นตัวกำหนดปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) จากบัสเค (k) ถึงบัสเอ็ม (m) นั่นคือค่า P_{km}^{reg} จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km}^{X_{TCSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_k} V_m & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \frac{\Delta X_{TCSC}}{X_{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

เมื่อ $\Delta P_{km}^{X_{TCSC}}$ มีค่าเป็น

$$\Delta P_{km}^{X_{TCSC}} = P_{km}^{reg} - P_{km}^{X_{TCSC}, cal} \quad (2.39)$$

และค่ารีแอคแตนซ์อนุกรม (Series Reactance) มีสัญลักษณ์เป็น (ΔX_{TCSC}) ซึ่งเป็นตัวชี้แจงการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) กำหนดให้โดย

$$\Delta X_{TCSC} = X_{TCSC}^{(i)} - X_{TCSC}^{(i-1)} \quad (2.40)$$

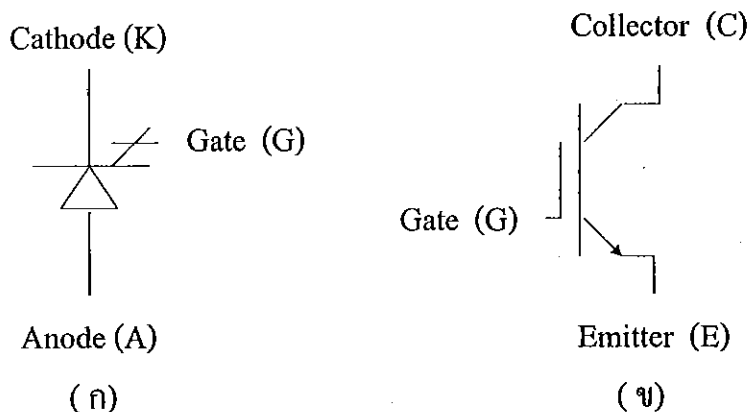
เมื่อรีแอคแตนซ์อนุกรม (Series Reactance) มีค่าเพิ่มมากขึ้น และกำลังไฟฟ้า $P_{km}^{X_{TCSC}, cal}$ คำนวณได้จากสมการ (2.36)

2.5.3 Unified Power Flow Controller (UPFC)

การควบคุมในทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้สารกึ่งตัวนำ

การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ใช้คอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Converters) ซึ่งสามารถสร้างกำลังไฟฟารีแอคทีฟ (Reactive Power) โดยไม่จำเป็นต้องมีองค์ประกอบขนาดใหญ่สำหรับเก็บกำลังไฟฟ้าดังกล่าว ดังเช่นในระบบ SVC ซึ่งทำได้โดยการให้กระแสไฟฟ้าหมุนเวียนผ่านทั้งสามเฟสของระบบกระแสสลับ (AC System) ด้วยอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งอย่างรวดเร็ว (Fast Switching Devices)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า โดยเฉพาะคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Converters) ได้ถูกนำมาใช้ในระบบแบบใหม่ เช่น Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) และ Gate Turn-Off Thyristor (GTO) สัญลักษณ์ของวงจรแสดงในรูปที่ 2.19 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 สัญลักษณ์ของวงจรรสำหรับ (ก) เกทเทรินออฟไทรสเตอร์ (Gate Turn-Off Thyristor) และ (ข) อินซูลเกตเตอร์ไบโพลาร์ไทรสเตอร์ (Insulated Gate Bipolar Transistor) [4].

GTO ได้จากการประยุกต์ใช้ไทรสเตอร์ ซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงสวิตช์ออน (Switched-On) อีกทั้งยังสามารถทำงานได้ในช่วงสวิตช์ออฟ (Switched-Off) ณ เวลาที่แตกต่างกัน เมื่อปล่อยให้กระแสไปข้างหน้า (Forward Current) ตกโดยธรรมชาติ เพื่อที่จะรักษายานาของกระแส ดังนั้นจึงสามารถนำหน้าที่ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพิ่มเติมโดยเฉพาะในทางอุตสาหกรรม ปัจจุบันมีความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ในระดับเมกะวัตต์ อย่างไรก็ตามมีการสร้างห้องจำลองสำหรับปรับปรุงโครงสร้างและออกแบบ GTO เมื่อพัลส์ลบขนาดใหญ่ (Large Negative Pluses) ยังคงต้องการในการเทรินออฟ (Turn Off) GTO ซึ่งความถี่ในการสวิตช์สูงสุด (Maximum Switching Frequency) ที่สามารถทำได้คือ 1 kHz

IGBT เป็นอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาเป็นอย่างดีในตระกูลของทรานซิสเตอร์กำลัง มันเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับขับเคลื่อนทั้งในระบบกระแสสลับ (AC System) และระบบกระแสตรง (DC System) ไปจนถึงระดับกำลังอย่างน้อยที่สุด 100 kW ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความมุ่งหมายในการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์กำลัง (Power Converters) โดยเริ่มแรกจะใช้ IGBTs เนื่องจาก IGBTs สามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของความจุกำลังไฟฟ้าได้และความสูญเสียในการนำไฟฟ้าต่ำ ในอนาคตมีการคาดหวังสำหรับความเจริญก้าวหน้าที่ยิ่งขึ้นทั้งในส่วนของเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้งานสำหรับ IGBT และ GTO

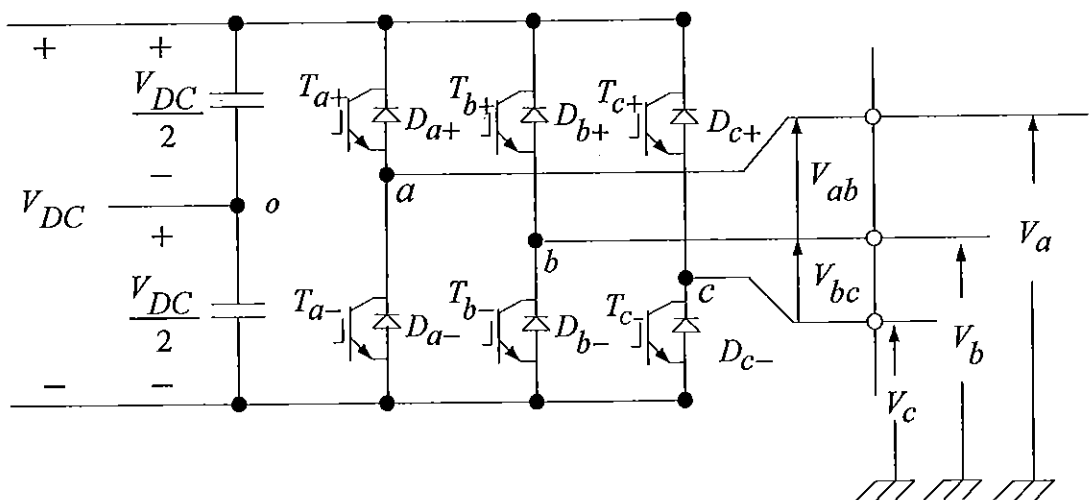
สำหรับคอนเวอร์เตอร์แปลง DC เป็น AC (DC-AC Converters) นั้น ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำควบคุมเต็มที่มีมากกว่าไทรสเตอร์ทั่วไป ซึ่ง DC อินพุตสามารถเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source เป็นลักษณะของคาปาซิเตอร์) หรือเป็นแหล่งจ่ายกระแส (Current Source เป็นลักษณะของแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอินดักเตอร์) อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยอ้างอิงกับหลักการพื้นฐานนี้ คอนเวอร์เตอร์สามารถถูกจำแนกเป็น Voltage Source Converter (VSCs) หรือ Current Source Converter อย่างใดอย่างหนึ่ง จากเหตุผลในทางเศรษฐศาสตร์และสมรรถนะการควบคุมกำลังไฟฟ้า

รีแอกทีฟ (Reactive Power) ส่วนใหญ่จะใช้แบบโครงสร้าง VSC (VSC Topology) ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่และสามารถนำมาใช้กับพิกัดกระแสสูงและแรงดันสูง เช่น GTOs หรือ IGBTs ซึ่งทำได้โดยยึดหลักการชดเชยรีแอกทีฟ (Reactive Compensation) โดยใช้คอนเวอร์เตอร์สวิตช์ (Switching Converter) ในการประยุกต์ใช้กับพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆ

การควบคุมระบบกำลังไฟฟ้านั้นใช้จำนวนของ VSCs ในการสร้างบล็อกพื้นฐานสำหรับการดำเนินการที่แตกต่างกันในส่วนต่างๆของโลก ที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ STATCOMs, Solid-State Series Controllers (SSSCs), UPFC และ HVDC-VSC

1. Voltage Source Converter

มีหลายแบบโครงสร้างของ VSC ที่นำมาใช้ในการดำเนินการในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งบางแบบโครงสร้างสามารถนำมาใช้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า โดยประกอบด้วย ฟูลบริดจ์ (Full Bridge) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า H-Bridge ทั้งแบบหนึ่งเฟสและแบบสามเฟส ทรานซิสเตอร์สองระดับทั้งแบบหนึ่งเฟสและแบบสามเฟส คอนเวอร์เตอร์สามระดับ โดยยึดหลักการรวมจุดนิวทรัลของคอนเวอร์เตอร์ไว้ด้วยกัน แบบโครงสร้างอื่นๆของ VSC เป็นการนำแบบโครงสร้างมารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งยังคงยึดหลักการเดิม นั่นคือการรวมจุดนิวทรัลของคอนเวอร์เตอร์ไว้ด้วยกันและระบบฐานหลายระดับ วัตถุประสงค์โดยทั่วไปของการศึกษาแบบ โครงสร้างคือ ลดความถี่การดำเนินการของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำภายใน VSC ให้เหลือน้อยที่สุดและสร้างรูปคลื่นแรงดันให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด เพื่อจะที่จะไม่ต้องมีตัวกรองหรือมีให้น้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น แบบโครงสร้างของ VSC 2 ระดับธรรมดาซึ่งใช้ IGBT เป็นสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แบบโครงสร้างสามเฟสของ Voltage Source Converter (VSC) 2 ระดับ โดยใช้ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBTs) เป็นสวิตช์ [4].

VSC ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ประกอบด้วย IGBT 6 ตัว โดยแยกใช้ IGBT 2 ตัวที่แต่ละขาของ VSC นอกจากนั้นยังมีการเชื่อมต่อไดโอดขนานกลับขั้วเข้ากับแต่ละ IGBT เพื่อเป็นการกำหนดทิศทางการไหลของกระแสจากผลของแรงดันย้อนกลับที่อาจเกิดขึ้นได้ อันเนื่องมาจากสภาพวงจรภายนอก โดยคาปาซิเตอร์ทั้งสองตัวมีขนาดเท่ากันและทำการติดตั้งทางด้านกระแสตรง (DC) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสำหรับจัดให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power)

ถึงแม้ว่าจะไม่แสดงให้เห็นในวงจรดังรูปที่ 2.18 โมดูลควบคุมการสวิตช์ซึ่งถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบทั้งหมดของ VSC มีหน้าที่ควบคุมลำดับการสวิตช์ ซึ่งเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำใน VSC เพื่อที่จะทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ให้มากที่สุดและสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่พิกัดสูงๆ อีกทั้งยังเกิดความสูญเสียจากการสวิตช์ซึ่งน้อยที่สุด

การศึกษากระแสสวิตช์ของ VSC เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ อาจจะถูกจำแนกเป็น 2 วิธี ดังต่อไปนี้

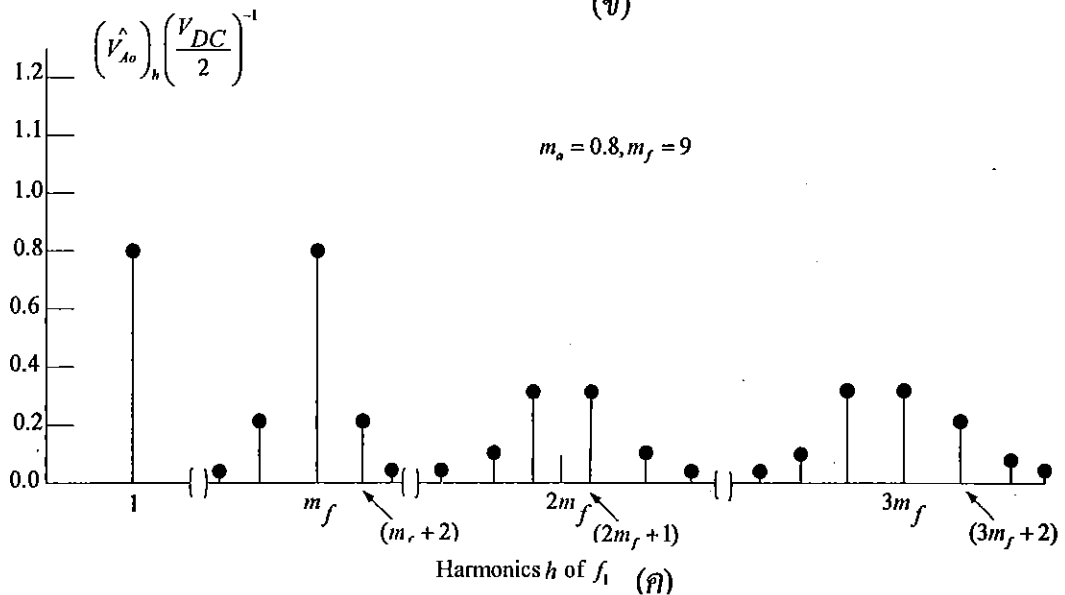
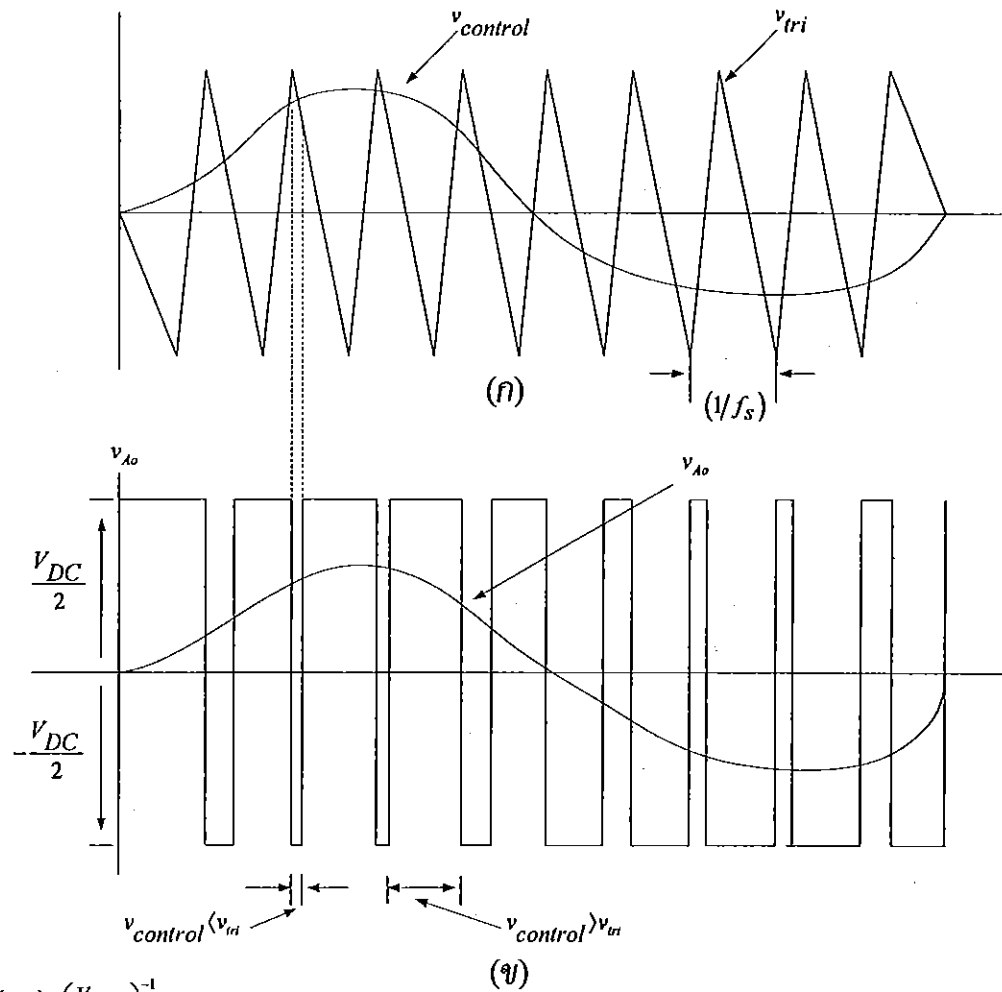
- ความถี่พื้นฐานของการสวิตช์ การสวิตช์ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแต่ละตัวเป็นการจำกัดการเทรินออน (Turn-On) 1 ครั้ง และการเทรินออฟ (Turn-Off) 1 ครั้ง ต่อ 1 cycle โทโพโลยีของ VSC พื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยใช้การสวิตช์ที่ความถี่พื้นฐาน ทำให้เกิดรูปคลื่นเอาต์พุตที่มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยยังคงบรรจุมอนิเตอร์ลำดับสูงๆที่ไม่สามารถยอมรับได้ ซึ่งคือกระแสที่ใช้ดำเนินการทั้ง 6 พัลส์ของ VSC โครงสร้างพัลส์ทั้งหลายถูกจัดการเกี่ยวกับรูปแบบของคลื่น ทำให้ได้คุณสมบัติรูปคลื่นที่ดีขึ้นและพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น

- Pulse-Width Modulation (PWM) เทคนิคการควบคุมแบบนี้สามารถใช้เป็นสวิตช์ในการเทรินออน (Turn-On) และเทรินออฟ (Turn-Off) ที่พิกัดความถี่ที่สูงขึ้นกว่าความถี่พื้นฐาน รูปแบบคลื่นเอาต์พุตถูกตัดและขยายกว้างขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับพัลส์ เนื่องจากไม่ต้องการรูปคลื่นเอาต์พุตที่มีฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่สูงๆและต้องการกรองให้ลดลงมากที่สุด ตลอดหลายปีที่ผ่านมา เทคนิคการควบคุม PWM ต่างๆได้ถูกตีพิมพ์ โดยแผนผัง PWM ไซนุสชอยคอสมี ความสำคัญมาก เนื่องจากมีความเรียบง่ายและมีประสิทธิภาพ

จากมุมมองของการนำไปประยุกต์ใช้ เทคนิคการสวิตช์ทั้งสองสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม ซึ่งเทคนิคการสวิตช์ที่ความถี่พื้นฐานมีความต้องการหม้อแปลงเชิงซ้อน เพื่อจัดการให้ความถี่ของรูปคลื่นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การชดเชยข้อบกพร่องนี้มีประโยชน์ในการสวิตช์สารกึ่งตัวนำที่ความถี่สูงๆและความสูญเสียจากการสวิตช์ต่ำ เทคนิคการสวิตช์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบแรงดันสูงและพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆ เทคนิค PWM ทำให้เกิดการสูญเสียในการสวิตช์สูง ได้มีการคาดการณ์ไว้ว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในอนาคตจะสามารถลดผลอันนี้ได้ หรือให้มีผลน้อยที่สุด การสวิตช์โดยทั่วไปมักใช้เทคนิค PWM ในการนำไปใช้งานกับระบบสายส่งแรงดันสูงและระบบสายส่งแรงดันสูงพิเศษ

- Pulse-Width Modulation Control

วิธีการควบคุม PWM พื้นฐานสามารถอธิบายด้วยรูปที่ 2.19 สัญญาณความถี่พื้นฐานของฟังก์ชันรูปไซน์ (Sinusoidal) ถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของการควบคุมการจูนชนวนของลิ้นเปิดปิดอิสระของแบบโครงสร้างคอนเวอเตอร์ที่กำหนดให้ ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.18 สัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณฟังก์ชันรูปไซน์ (Sinusoidal) อีกทั้งความถี่ที่เกี่ยวข้องทั้งหลาย คือเทอมอ้างอิงของสัญญาณ Carrier และความถี่ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณฟังก์ชันรูปไซน์ (Sinusoidal) เพื่อต่อต้านแอมพลิจูดคั้งเคิมของสัญญาณ Carrier ซึ่งโดยปกติจะควบคุมไว้ที่ 1 p.u. แอมพลิจูดขององค์ประกอบที่ความถี่พื้นฐานของผลลัพธ์จากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเชิงเส้นในรูปที่ 2.19 (ก) -2.19 (ค) ความถี่ Carrier (f_c) ให้ไป 9 time เพื่อให้ได้ความถี่ f_1



รูปที่ 2.19 การดำเนินการของ Pulse-Width Modulation (ก) การเปรียบเทียบความถี่พื้นฐานของ ฟังก์ชันรูปไซน์ (Sinusoidal) กับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง (ข) ผลลัพธ์ต่อเนื่อง จาก (ข) จะได้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (ค) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์แรงดัน [4].

ความกว้างของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมถูกทำให้แคบลงเพื่อให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันรูปไซน์ (Sinusoidal) องค์ประกอบพื้นฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์สามารถคำนวณได้โดยการวิเคราะห์ฟูเรียร์ การคำนวณขนาดและความถี่ ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในเทอมฮาร์มอนิกส์และเทอมพื้นฐาน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ โดยใช้แนวความคิด Amplitude Modulation Ratio (m_a) และ Frequency Modulation Ratio (m_f)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.41)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.42)$$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณฟังก์ชันรูปไซน์ (Control) และ

\hat{V}_{tri} คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณสามเหลี่ยม (Carrier) ในทางปฏิบัติกำหนดให้เป็นค่าคงที่

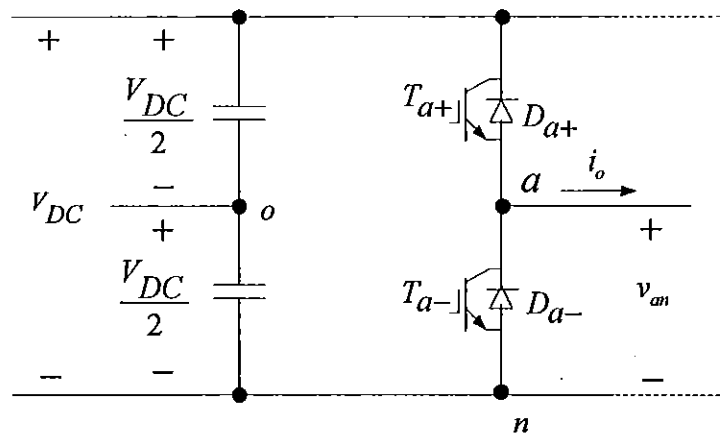
f_s คือ ความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม (Carrier)

f_1 คือ ความถี่เริ่มแรก หรือความถี่ที่ 1

โดยอ้างอิง 1 ขาของคอนเวอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งสอดคล้องกับ 1 ขาของคอนเวอเตอร์สามเฟสจากรูปที่ 2.18 สวิตช์ T_{a+} และ T_{a-} ถูกควบคุมโดยตรงจากการเปรียบเทียบของ $v_{control}$ และ v_{tri} แรงดันเอาต์พุตที่ได้ เป็นดังต่อไปนี้

$$v_{ao} = \begin{cases} \frac{1}{2} V_{DC}, V_{control} > V_{tri}; T_{a+} \\ -\frac{1}{2} V_{DC}, V_{control} < V_{tri}; T_{a-} \end{cases} \quad (2.43)$$

แรงดันเอาต์พุต v_{ao} เปลี่ยนแปลงระหว่าง $-V_{DC}/2$ และ $V_{DC}/2$ นั่นคือ T_{a-} และ T_{a+} ไม่ปิดในเวลาเดียวกัน และไม่ขึ้นกับทิศทางของ i_o



รูปที่ 2.20 1 ขาของ Voltage Source Converter (VSC) [4].

แรงดันเอาต์พุต (v_{ao}) และองค์ประกอบที่ความถี่พื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.19 (ข) สำหรับกรณี $m_f = 9$ และ $m_a = 0.8$ ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมแรงดันฮาร์มอนิกส์ในรูปแบบมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ค) ซึ่งเป็นกรณีของการควบคุมแรงดันเชิงเส้นที่เมื่อ $m_a < 1$ รูปแบบอื่นๆของการควบคุมแรงดันเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Overmodulation และ Square-Wave Modulation โดยก่อนหน้านี้เกิดขึ้นในช่วง $1 < m_a < 3.24$ และต่อมาเป็นการนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ $m_a > 3.24$

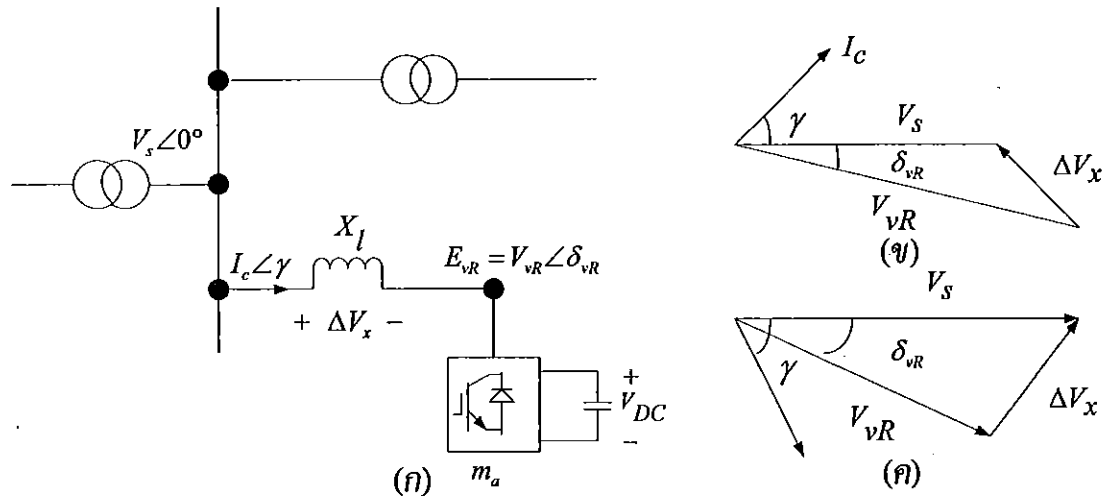
มีเพียงกรณีของการควบคุมแรงดันเชิงเส้น ($m_a < 1$) ที่น่าสนใจในส่วนนี้ แอมพลิจูดสูงสุดขององค์ประกอบที่ความถี่พื้นฐาน m_a คูณด้วย $V_{DC}/2$ และเกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นที่ sideband ศูนย์กลางรอบๆความถี่สวิตช์ซึ่งและมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ การนิยามที่ดีมีรูปแบบดังที่กำหนดให้ต่อไปนี้

$$f_h = (\beta m_f \pm k) f_1 \tag{2.44}$$

เทอมของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น มีเพียงค่าที่เป็นเลขคี่ของ β กับค่าที่เป็นเลขคู่ของ k ในทางกลับกันค่าที่เป็นเลขคู่ของ β รวมเข้ากับค่าที่เป็นเลขคี่ของ k นอกจากนี้แล้ว ฮาร์มอนิกส์ m_f ควรจะเป็นจำนวนเต็มคี่เพื่อป้องกันการเกิดขึ้นของเทอมฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่ในแรงดันเอาต์พุต (v_{ao})

- ทฤษฎีการดำเนินการของ Voltage Source Converter (VSC)

ความสัมพันธ์ระหว่าง VSC และระบบไฟฟ้ากำลังอาจจะอธิบายได้ในเทอมพื้นฐาน โดยการพิจารณาการเชื่อมต่อ VSC เข้ากับ AC Mains ผ่านรีแอกเตอร์ (Reactor) ความสูญเสียต่ำ ดังแสดงตัวอย่างซึ่งเกิดไลน์โคอะแกรม (Single Line Diagram) ในรูปที่ 2.21 (ก)



รูปที่ 2.21 การดำเนินการพื้นฐานของ Voltage Source Converter (VSC) (ก) VSC ถูกเชื่อมต่อเข้ากับ บัสของระบบ (ข) เวกเตอร์สเปซ (Space Vector) แสดงการดำเนินการล่าหลัง (Lagging) (ค) เวกเตอร์สเปซ (Space Vector) แสดงการดำเนินการแบบนำหน้า (Leading) [4].

จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดและมุมเฟสของแรงดันตก (ΔV_x) ซึ่งตกคร่อมรีแอกเตอร์ (Reactor, X_l) โดยสามารถควบคุมได้ การนิยามปริมาณและทิศทางของการไหลกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ผ่านรีแอกเตอร์ (Reactor, X_l) โดยการ กำหนดแรงดันที่บัสแหล่งจ่าย (Supply Bus) เป็นสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal) มีค่าเป็น $V_s \angle 0^\circ$ และองค์ประกอบที่ความถี่พื้นฐานของแรงดันกระแสสลับ (AC) ของ VSC กำหนดให้เป็น $V_{vR} \angle \delta_{vR}$ การแทนด้วยเวกเตอร์ความถี่พื้นฐานลำดับบวกแสดงในรูปที่ 2.21 (ข) และ 2.21 (ค) สำหรับการชดเชย Leading VAR และ Lagging VAR ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.21 สำหรับทั้ง Lagging VAR และ Leading VAR ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \sin \delta_{vR} \\ Q &= \frac{V_s^2}{X_l} - \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \cos \delta_{vR} \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

อ้างอิงจากรูปที่ 2.21 และสมการ (2.45) ทำให้ได้ข้อมูลต่อไปนี้

- แรงดันเอาต์พุต VSC (V_{VR}) ล้าหลังแรงดันแหล่งจ่าย AC (V_S) ด้วยมุม δ_{VR} และ กระแสอินพุตล้าหลังแรงดันตกซึ่งตกคร่อมรีแอคเตอร์ (Reactor, ΔV_X) ด้วยมุม $\pi/2$

- กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ที่ไหลระหว่างแหล่งจ่าย AC และ VSC ซึ่งถูกควบคุมโดยมุมเฟส δ_{VR} การไหลกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ไปยัง VSC จากแหล่งจ่าย AC สำหรับ lagging $\delta_{VR} (\delta_{VR} > 0)$ และ การไหลกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ไปยัง VSC จากแหล่งจ่าย AC สำหรับ Leading $\delta_{VR} (\delta_{VR} < 0)$

- การไหลกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) ถูกคำนวณโดยขนาดของแรงดัน (V_S) และแรงดันเอาต์พุตพื้นฐานของ VSC (V_{VR})

สำหรับ $V_{VR} > V_S$ แล้ว VSC ให้กำเนิดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) และเมื่อ $V_{VR} < V_S$ แล้ว VSC จะบริโภคกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power)

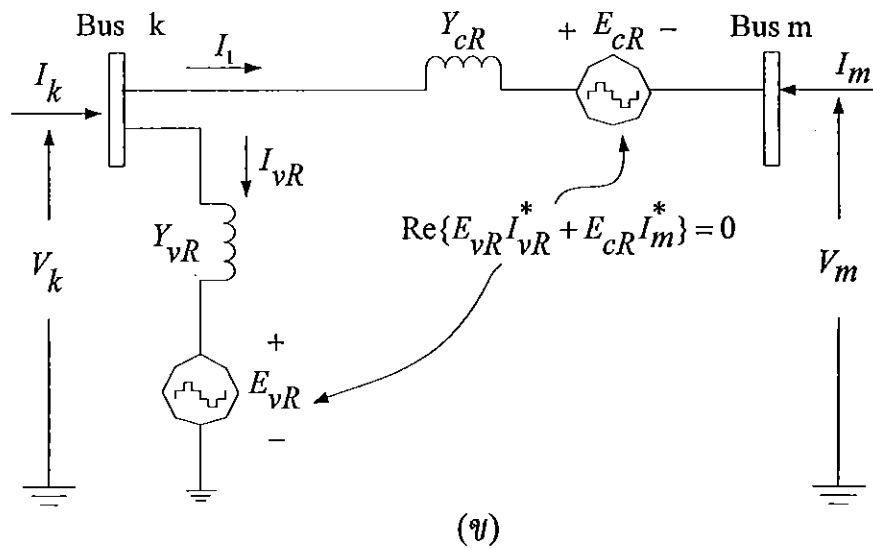
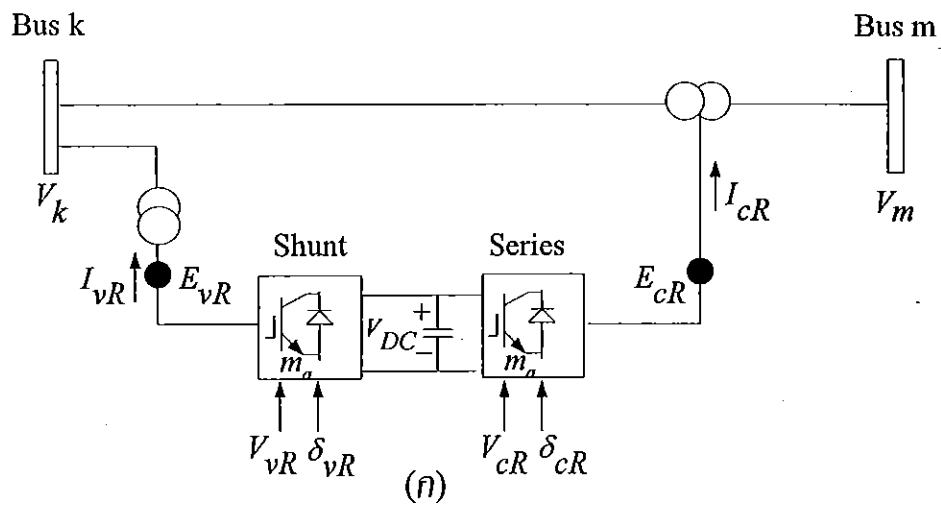
แรงดัน DC ตกคร่อมคาปาซิเตอร์ (V_{DC}) ถูกควบคุมโดยการปรับการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ที่ไหลไปยัง VSC ระหว่างการดำเนินการพื้นฐาน จำนวนเล็กน้อยของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ต้องไหลไปยัง VSC เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายใน VSC และรักษามุม δ_{VR} ไว้ให้มีค่ามากกว่า 0° เล็กน้อย (Lagging)

การควบคุมการเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้ากำลังนั้นใช้ VSC สร้างบล็อกพื้นฐานโดยอ้างอิงคุณลักษณะการดำเนินการในสภาวะอยู่ตัวเป็นหลักและผลกระทบต่อ การควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า และแรงดันระบบ

2. Unified Power Flow Controller (UPFC)

UPFC ประกอบด้วย VSC 2 ตัว โดยใช้คาปาซิเตอร์ร่วมกัน โดยแรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์เป็นแรงดันกระแสตรง (DC) ซึ่งเป็นการรวมระบบควบคุมให้เป็นหนึ่งเดียว สามารถแสดงแผนผังพื้นฐานของ UPFC ได้ดังรูปที่ 2.22 (ก) และวงจรสมมูลในรูปที่ 2.22 (ข)

UPFC สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) อีกทั้งยังสามารถควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เข้าของ UPFC ในการควบคุมอาจจะกำหนดการควบคุมพารามิเตอร์เพียงตัวเดียวหรือหลายๆพารามิเตอร์ร่วมกัน หรืออาจจะไม่ควบคุมพารามิเตอร์ใดๆเลยก็ได้



รูปที่ 2.22 ระบบของ Unified Power Flow Controller (UPFC) (ก) ทำด้วยตัวของ Voltage Source Converters (VSC) 2 ตัว โดย VSC ตัวแรกถูกเชื่อมต่อเข้ากับ โครงข่ายกระแสสลับ (AC) โดยใช้หม้อแปลงขานานและ VSC ตัวที่สองถูกเชื่อมต่อเข้ากับ โครงข่ายกระแสสลับ (AC) โดยใช้หม้อแปลงอนุกรม (ข) วงจรเทียบเท่าของ UPFC [4].

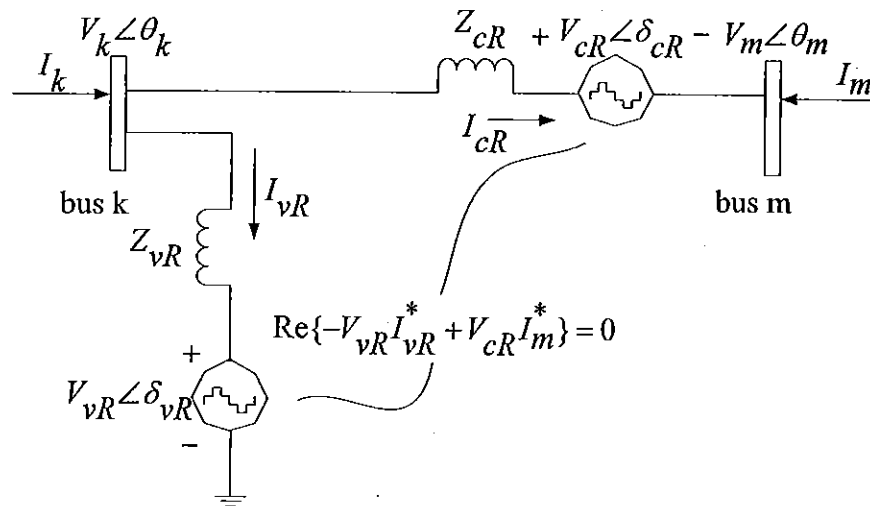
ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ของคอนเวอร์เตอร์อนุกรม ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ขานานจะทำหน้าที่ดึงกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) จากโครงข่ายกระแสสลับ (AC) และจ่ายให้บัส m ผ่านการเชื่อมโยงกระแสตรง (DC) แรงดันเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์อนุกรมเพิ่มขึ้นถึงแรงดันโหนดหรืออาจกล่าวได้ว่าบัสเค (k) สามารถส่งผลให้มีการเพิ่มแรงดัน โหนดที่บัสเอ็ม (m) ได้ แรงดันเอาต์พุท V_{cR} สามารถปรับขนาดแรงดันและมุมเฟส δ_{cR} ซึ่งสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้

นอกจากนี้แล้ว บทบาทในการสนับสนุนการจัดให้กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนระหว่างคอนเวอร์เตอร์อนุกรมและระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) คอนเวอร์

เตอร์ขนานสามารถให้กำเนิดหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Power) เพื่อที่จะจัดให้ขนาดของแรงดันซึ่งมีการปรับเปลี่ยนอย่างอิสระ ณ จุดที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC)

Unified Power Flow Controller ในระบบ 1 เฟส

ทฤษฎีการดำเนินการพื้นฐานของ UPFC ซึ่งได้อธิบายแล้วในหัวข้อ การควบคุมในทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้สารกึ่งตัวนำ จากนั้นได้อธิบายวงจรเทียบเท่าอันประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งโคโรนัสที่สอดคล้องกัน 2 แหล่ง ซึ่งเพียงพอในการแสดง UPFC สำหรับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ที่สภาวะอยู่ตัว (Steady-State) ณ ความถี่พื้นฐาน ดังนั้นจากวงจรเทียบเท่าดังแสดงในรูปที่ 2.23 แหล่งจ่ายแรงดันซึ่งโคโรนัสสามารถแทนได้ด้วยของค้ประกอบอนุกรมฟูเรียร์พื้นฐาน ของรูปแบบคลื่นแรงดันสวิตซ์ที่ขั้วของคอนเวอร์เตอร์กระแสสลับ (AC) ของ UPFC



รูปที่ 2.23 วงจรเทียบเท่าของ Unified Power Flow Controller (UPFC) [4].

แหล่งจ่ายแรงดัน UPFC

$$E_{vR} = V_{vR} (\cos \delta_{vR} + j \sin \delta_{vR}), \quad (2.46)$$

$$E_{cR} = V_{cR} (\cos \delta_{cR} + j \sin \delta_{cR}), \quad (2.47)$$

เมื่อ V_{vR} และ δ_{vR} สามารถควบคุมขนาด ($V_{vRmin} \leq V_{vR} \leq V_{vRmax}$) และมุมเฟส ($0 \leq \delta_{vR} \leq 2\pi$) ของแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งแทนคอนเวอร์เตอร์ขนาน ขนาดแรงดัน V_{vR} และมุมเฟส δ_{vR} ของแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งแทนคอนเวอร์เตอร์อนุกรม ถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง ($V_{cRmin} \leq V_{cR} \leq V_{cRmax}$) และ ($0 \leq \delta_{cR} \leq 2\pi$) ตามลำดับ

การกำหนดมุมเฟสของแรงดันอนุกรมที่ถูกคิดเป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ถ้า δ_{cR} เฟสตรงกันกับมุมของแรงดัน โหนด θ_k ซึ่ง UPFC จะมีความสามารถในการปรับแรงดันชั่ว ถ้า δ_{cR} ควอดแดเจอร์ (Quadrature) ตรงกันกับมุมของแรงดัน โหนด θ_k ซึ่ง UPFC จะมีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) การกระทำดังกล่าวนี้เทียบเท่ากับการเลื่อนเฟส ถ้า δ_{cR} ควอดแดเจอร์ (Quadrature) ตรงกันกับมุมกระแสไลน์แล้ว มันจะสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) การกระทำดังกล่าวนี้เทียบเท่ากับการชดเชยแบบอนุกรมที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ที่ค่าอื่นๆของ δ_{cR} ซึ่งการดำเนินการของ UPFC จะรวมทั้งการปรับแรงดันการชดเชยอนุกรมที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และการเลื่อนเฟส ขนาดของแรงดันอนุกรมที่ถูกคิดจะเป็นตัวกำหนดปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้า

รูปแบบการไหลของกำลังไฟฟ้า

จากวงจรเทียบเท่าดังแสดงในรูปที่ 2.23 สมการ (2.46) และสมการ (2.47) สมการกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และสมการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่บัส k เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} P_k = & V_k^2 G_{kk} + V_k V_m \left[G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \right] \\ & + V_k V_{cR} \left[G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{cR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{cR}) \right] \\ & + V_k V_{vR} \left[G_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) \right], \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} Q_k = & -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m \left[G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \right] \\ & + V_k V_{cR} \left[G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{cR}) - B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{cR}) \right] \\ & + V_k V_{vR} \left[G_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) \right]; \end{aligned} \quad (2.49)$$

ที่บัสเอ็ม m จะได้

$$\begin{aligned} P_m = & V_m^2 G_{mm} + V_m V_k \left[G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) \right] \\ & + V_m V_{cR} \left[G_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{cR}) + B_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{cR}) \right], \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} Q_m = & -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k \left[G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) \right] \\ & + V_m V_{cR} \left[G_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{cR}) - B_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{cR}) \right]; \end{aligned} \quad (2.51)$$

คอนเวอร์เตอร์อนุกรม จะได้

$$P_{cR} = V_{cR}^2 G_{mm} + V_{cR} V_k \left[G_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_k) + B_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_k) \right] \\ + V_{cR} V_m \left[G_{mm} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) + B_{mm} \sin(\delta_{cR} - \theta_m) \right]; \quad (2.52)$$

$$Q_{cR} = -V_{cR}^2 B_{mm} + V_{cR} V_k \left[G_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_k) - B_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_k) \right] \\ + V_{cR} V_m \left[G_{mm} \sin(\delta_{cR} - \theta_m) - B_{mm} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) \right]; \quad (2.53)$$

คอนเวอร์เตอร์ขนาน จะได้

$$P_{vR} = -V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k \left[G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) \right]; \quad (2.54)$$

$$Q_{vR} = V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k \left[G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) \right]; \quad (2.55)$$

สมมุติสันเปิดปิดคอนเวอร์เตอร์มีการสูญเสียเล็กๆ กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ถูกจ่ายให้คอนเวอร์เตอร์ขนาน (P_{vR}) เท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ของคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (P_{cR}) ดังนั้น จะได้ว่า

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (2.56)$$

มากกว่าไปกว่านั้น ถ้าการเชื่อมต่อหม้อแปลงสมมติว่าไม่มีความต้านทาน ดังนั้น กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ที่บัส k จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ที่บัส m ดังนั้น

$$P_{vR} + P_{cR} = P_k + P_m = 0 \quad (2.57)$$

สมการกำลังไฟฟ้าของ UPFC ในรูปแบบเชิงเส้นถูกรวมเข้ากับโครงข่ายกระแสสลับ (AC) สำหรับในกรณีที่เมื่อการควบคุมพารามิเตอร์ของ UPFC ต่อไปนี้

- (1) ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของคอนเวอร์เตอร์ขนานบัส k
- (2) การไหลกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) จากบัส m ไปยังบัส k

(3) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่ถูกฉีดเข้าที่บัส m และจากบัส m ไปยังบัสพีคิว (PQ)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \delta_{cR} \\ \frac{\Delta V_{cR}}{V_{cR}} \\ \Delta \delta_{vR} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

เมื่อ ΔP_{bb} คือกำลังไฟฟ้าที่ไม่เข้าคู่กัน (Power Mismatch) ซึ่งกำหนดให้ในสมการ (2.56)

ถ้าไม่สามารถควบคุมแรงดันที่บัส k คอลัมน์ที่ 3 ของสมการ (2.58) ให้ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่เกี่ยวกับตัวแปรตัวใดตัวหนึ่ง (ตัวแปรอื่นทั้งหมดคงที่) ของบัสและการไม่เข้าคู่กันของกำลังไฟฟ้าของ UPFC อันเนื่องมาจากขนาดของแรงดันบัส V_k มากไปกว่านั้น การเพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายขนาด $\Delta V_{vR}/V_{vR}$ เป็นการแทนที่การเพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันที่บัส k ที่มีการเพิ่มขึ้น $\Delta V_k/V_k$

ถ้าทั้งสองบัส นั่นคือบัส k และบัส m เป็นบัสพีคิว (PQ) ระบบสมการเชิงเส้น เป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \delta_{cR} \\ \frac{\Delta V_{cR}}{V_{cR}} \\ \Delta \delta_{vR} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

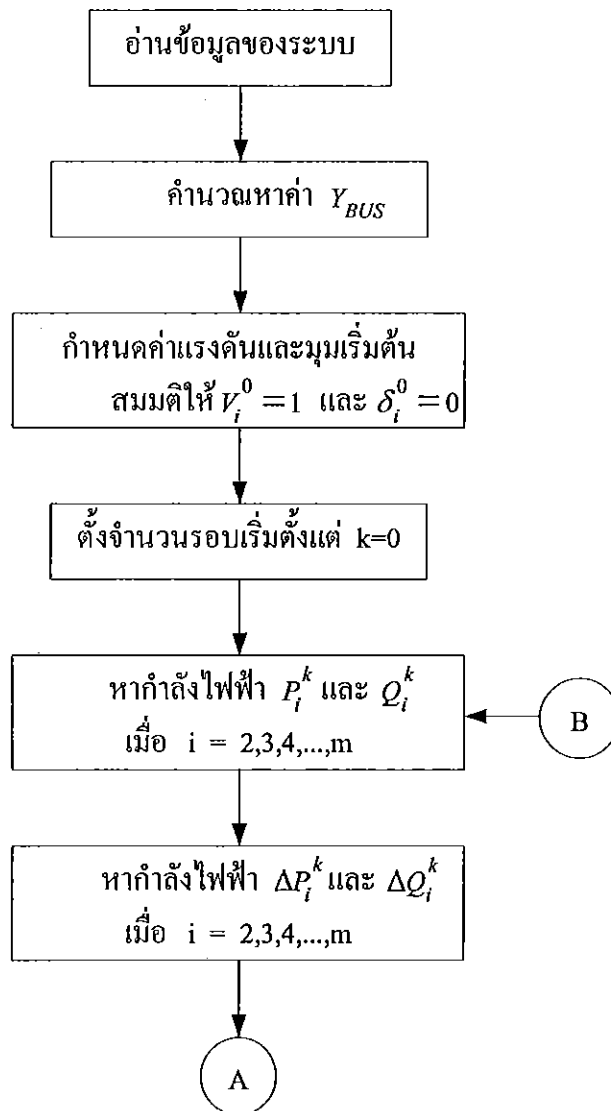
ในกรณีเช่นนี้ V_{vR} ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ภายในขอบเขตที่กำหนด ($V_{vRmin} \leq V_{vR} \leq V_{vRmax}$) เทอมของจาโคเบียนในสมการ (2.58) และสมการ (2.59) กำหนดให้ดังนี้

บทที่ 3

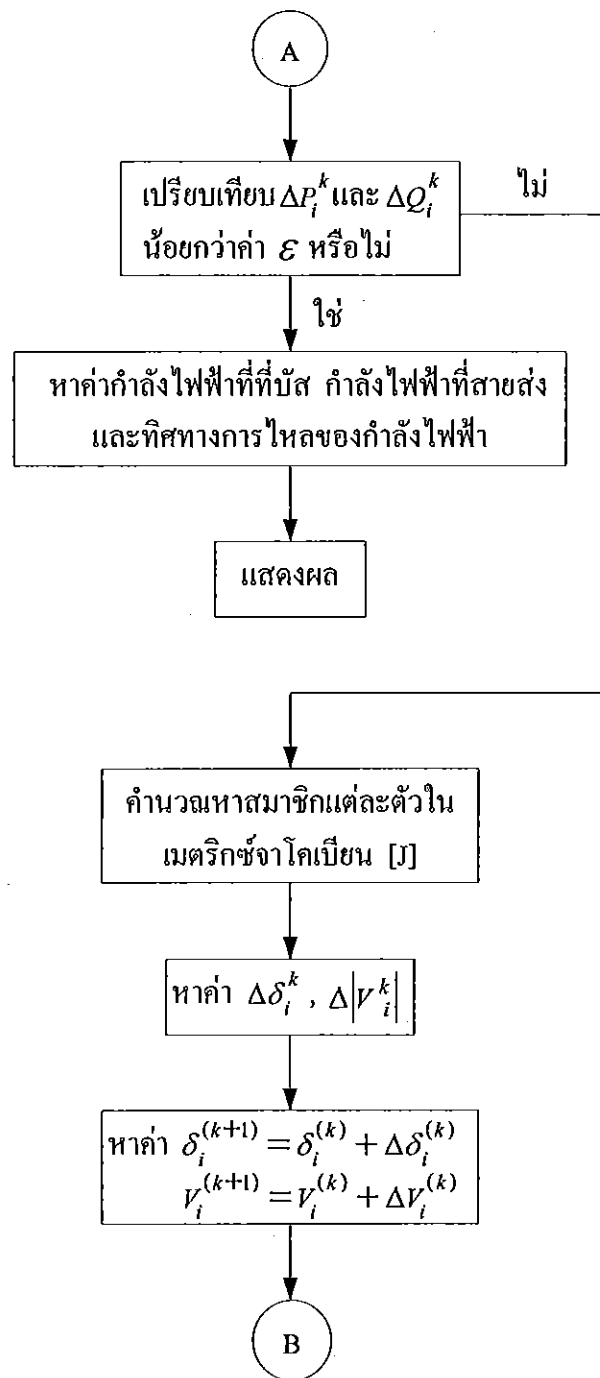
การออกแบบโปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ออกแบบโปรแกรมคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาที่ไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS และแบบที่ทำการต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบ ซึ่งอุปกรณ์ FACTS ที่ทำการต่อเข้าไปดังกล่าวประกอบด้วย SVC TCSC และ UPFC ตามลำดับ ในระบบ 5 บัส โดยใช้โปรแกรมเมทแลปเป็นเครื่องมือในการคำนวณ

3.1 หลักการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบธรรมดา



รูปที่ 3.1 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันแบบธรรมดา



รูปที่ 3.1 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันแบบธรรมดา (ต่อ)

ข้อมูลของระบบประกอบด้วย ค่าดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

PGEN = scheduled active power contributed by the generator

QGEN = scheduled reactive power contributed by the generator

QMAX = generator reactive power upper limit

QMIN = generator reactive power lower limit

PGEN (1) = 0; QGEN (1) = 0; QMAX (1) = 5; QMIN (1) = -5;

PGEN (2) = 0.4; QGEN (2) = 0; QMAX (2) = 3; QMIN (2) = -3;

2. สายส่ง

ntl = number of transmission line

tlsend = sending end of transmission line

tlrec = receiving end of transmission line

tlresis = series resistance of transmission line

tlreac = series reactance of transmission line

tlcond = shunt conductance of transmission line

tlsuscep = shunt susceptance of transmission line

tlsend (1) = 1; tlrec (1) = 2; tlresis (1) = 0.02; tlreac (1) = 0.06;

tlcond (1) = 0; tlsuscep (1) = 0.06;

tlsend (2) = 1; tlrec (2) = 3; tlresis (2) = 0.08; tlreac (2) = 0.24;

tlcond (2) = 0; tlsuscep (2) = 0.05;

tlsend (3) = 2; tlrec (3) = 3; tlresis (3) = 0.06; tlreac (3) = 0.18;

tlcond (3) = 0; tlsuscep (3) = 0.04;

tlsend (4) = 2; tlrec (4) = 4; tlresis(4) = 0.06; tlreac (4) = 0.18;

tlcond (4) = 0; tlsuscep (4) = 0.04;

tlsend (5) = 2; tlrec (5) = 5; tlresis (5) = 0.04; tlreac (5) = 0.12;

tlcond (5) = 0; tlsuscep (5) = 0.03;

tlsend (6) = 3; tlrec (6) = 4; tlresis (6) = 0.01; tlreac (6) = 0.03;

tlcond (6) = 0; tlsuscep (6) = 0.02;

tlsend (7) = 4; tlrec (7) = 5; tlresis (7) = 0.08; tlreac (7) = 0.24;

tlcond (7) = 0; tlsuscep (7) = 0.05;

3. ภาระไฟฟ้า

PLOAD = scheduled active power consumed at the bus

QLOAD = scheduled reactive power consumed at the bus

loadbus (1) = 2; PLOAD (1) = 0.2; QLOAD (1) = 0.1;

loadbus (2) = 3; PLOAD (2) = 0.45; QLOAD (2) = 0.15;

loadbus (3) = 4; PLOAD(3) = 0.4; QLOAD(3) = 0.05;

loadbus (4) = 5; PLOAD (4) = 0.6; QLOAD(4) = 0.1;

loadbus load element bus number

4. ประเภทของภาระไฟฟ้า

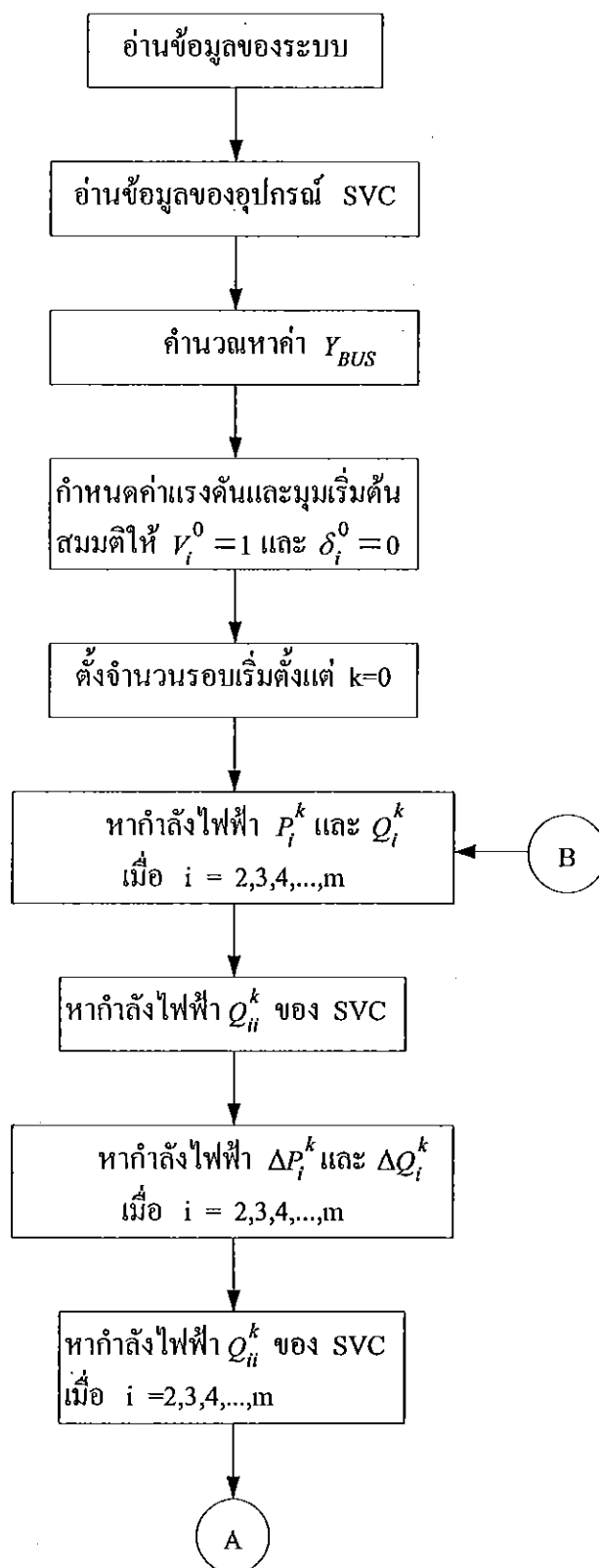
bustype = 1 is slack or swing bus

bustype = 2 is generator PV bus

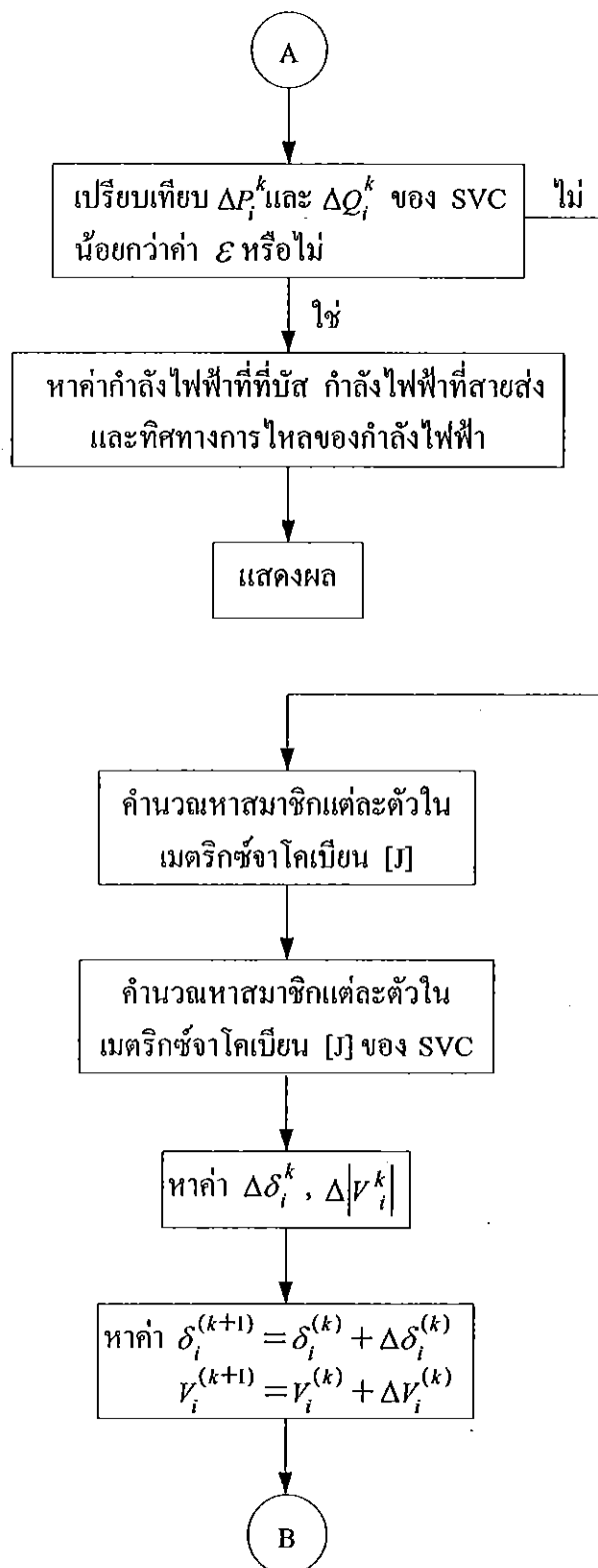
bustype = 3 is load PQ bus

bustype = 4 is generator PQ bus

3.2 หลักการคำนวณแบบวิธีนิวตันราฟสันแบบอุปกรณ์ SVC



รูปที่ 3.2 แสดง โฟลว์ชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 3.2 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าสู่ระบบ (ต่อ)

ข้อมูลของระบบ SVC ประกอบด้วย ค่าดังนี้

B: Initial SVC's susceptance value (p.u.)

BLo: Lower limit of variable susceptance (p.u.)

BHi: Higher limits\ of variable susceptance (p.u.)

TarVol: Target nodal voltage magnitude to be controlled by SVC(p.u.)

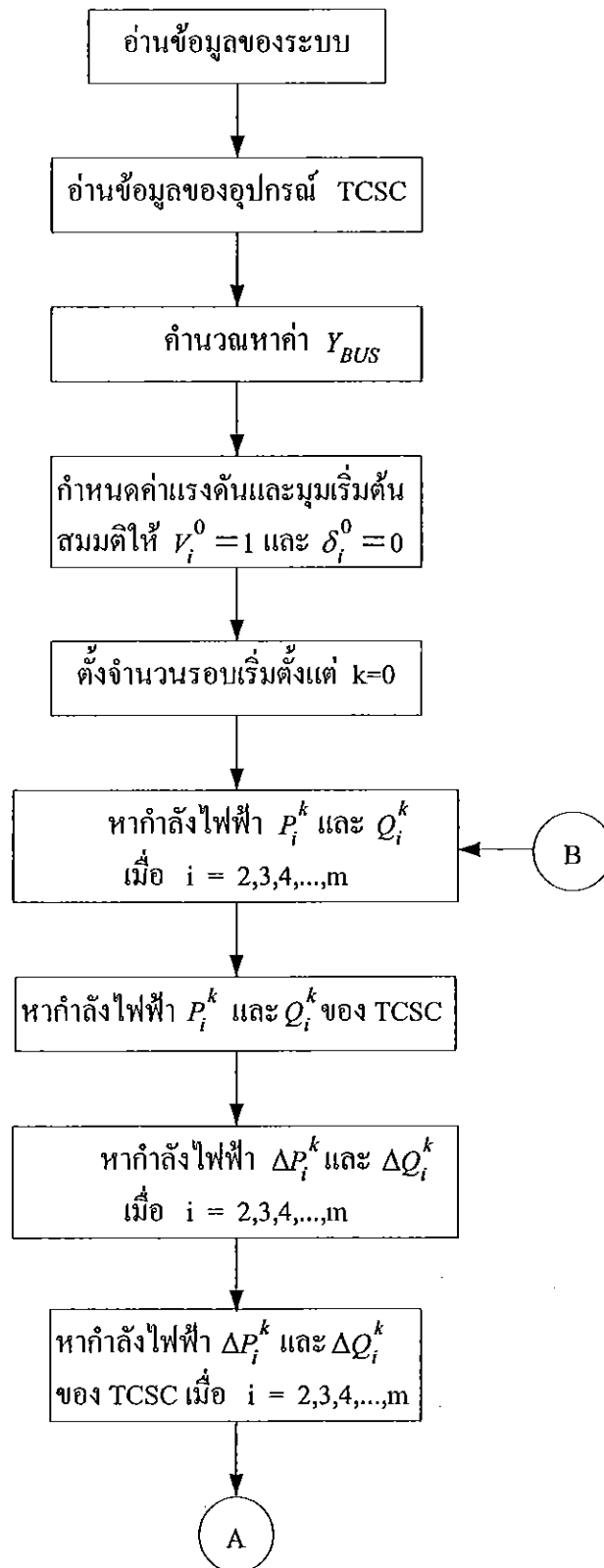
VSta: Indicay\te control status for nadal valtage magnitude :1 is

on and 0 is off

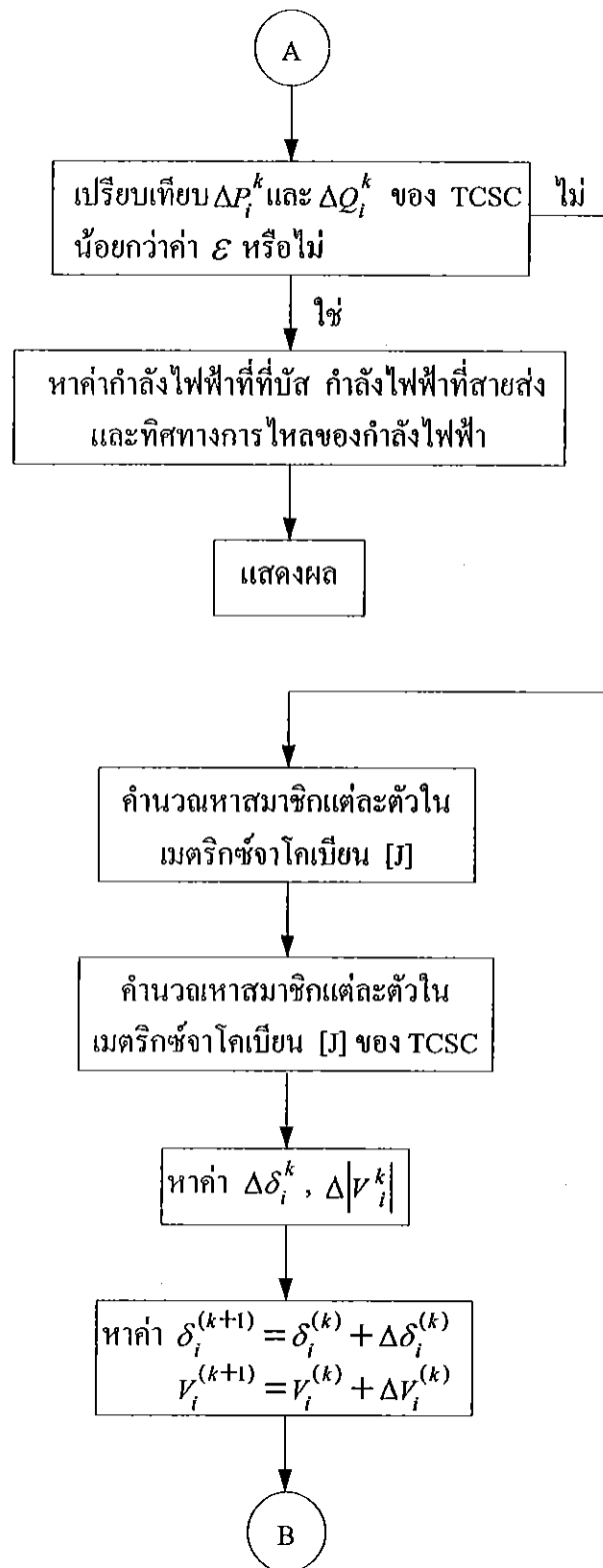
SVCsend (1) =3; B (1) = 0.02; BLo (1) =-0.25; BHi (1) = 0.25;

TarVol (1) = 1.0; VSta (1) = 1;

3.3 หลักการคำนวณแบบวิธีนิวตันราฟสันแบบอุปกรณ์ TCSC



รูปที่ 3.3 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 3.3 แสดงโพล์ชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าสู่ระบบ (ต่อ)

ข้อมูลของระบบ TCSC ประกอบด้วย ค่าดังนี้

TCSCsend = Sending Bus

TCSCrec = Receiving bus

X: TCSC's reactance

XLo: Lower reactance limit

XHi: High reactance limit

FLOW: Power flow direction:1 is for sending to receiving bus;-1

indicates opposite direction

Psp: Active power flow to be control

Psta: Indicates control status for active power:1 is on 0 is off

TCSCsend (1) = 3;

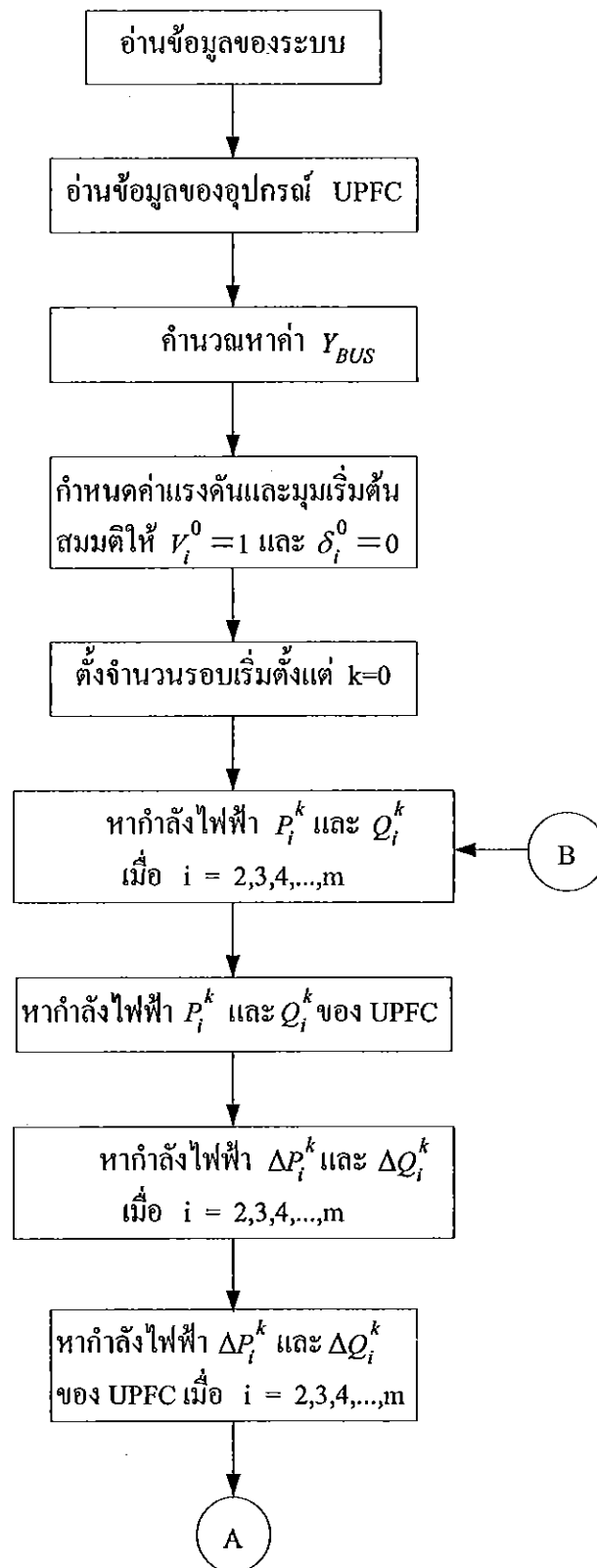
TCSCrec (1) = 6;

X (1) = -0.015; XLo (1) = -0.05;

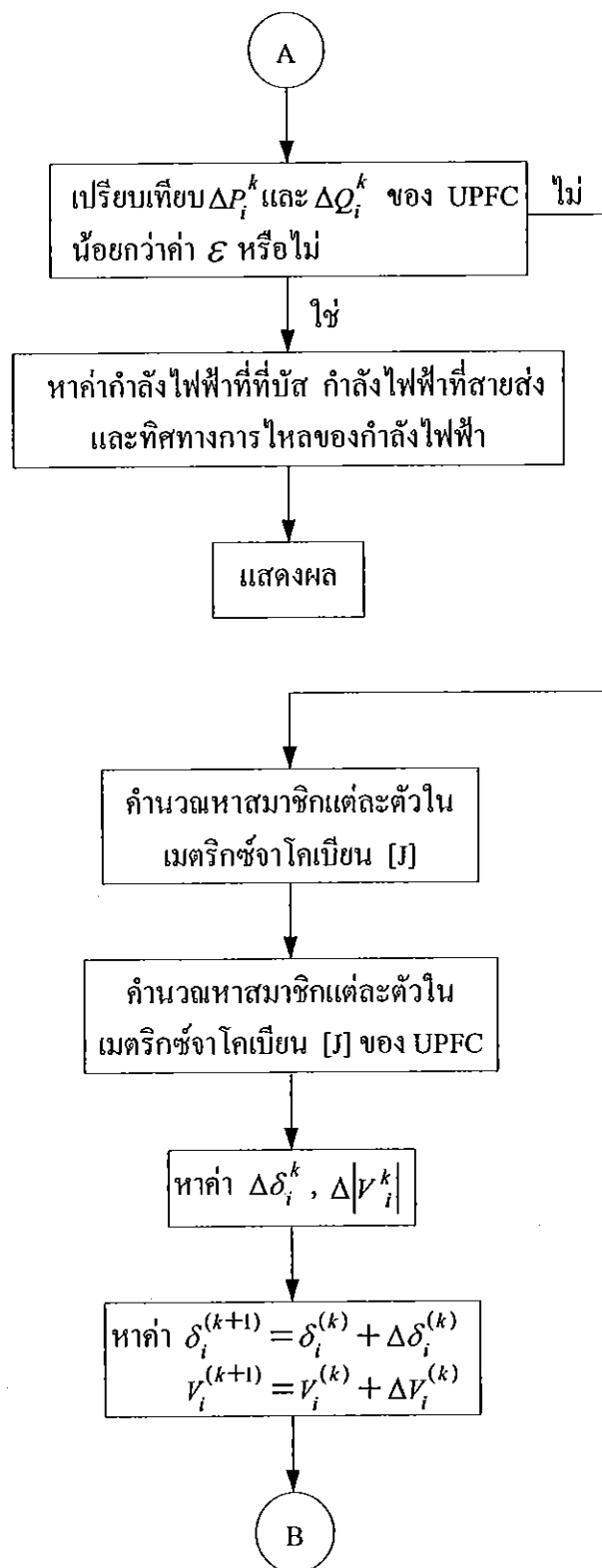
XHi (1) = 0.05;

Flow (1) = 1; Psp (1) = 0.21; PSta (1) = 1;

3.4 หลักการคำนวณแบบวิธีนิวตันกราฟสำหรับแบบอุปกรณ์ UPFC



รูปที่ 3.4 แสดงโพลีชาร์ตการทำงานของนิวตันกราฟสำหรับเมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 3.4 แสดงโฟลล์ชาร์ตการทำงานของนิวตันราฟสันเมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าสู่ระบบ (ต่อ)

ข้อมูลของระบบ UPFC ประกอบด้วย ค่าดังนี้

UPFCsend: Shunt converter 's bus and series converter's sending bus

UPFCrec: Series converter 'receiving bus

Xcr: Inductive reactance of Shunt impedance (p.u.)

Xvr: Inductive reactance of Series impedance (p.u.)

Flow: Power flow direction :1 is for sending to receiving bus -1 indicates opposite direction

Psp: Target active power flow (p.u.)

Psta: control status for active power:1 is on ;0 is off

Qsp: Target reactive power flow (p.u.)

Qsta: control status for reactive power:1 is on ;0 is off

Vcr: Intinal condition for the series source voltage magnitude (p.u.)

Tcr: Intinal condition for the series source voltage angle (p.u.)

VcrLo: Lower limit of series source voltage magnitude (p.u.)

VcrHi: Hight limit of series source voltage magnitude (p.u.)

Vvr: Intinal condition for the shunt source voltage magnitude (p.u.)

Tvr: Intinal condition for the shunt source voltage angle (p.u.)

VvrLo: Lower limit of shunt source voltage magnitude (p.u.)

VvrHi: Hight limit of shunt source voltage magnitude (p.u.)

VvrTar: Target nodal voltage magnitude to be controlled by shunt branch(p.u.)

VvrSta: Control status for nodal voltage magnitude :1 is on; 0 is off

NUPFC = 1;

UPFCsend (1) = 3; UPFCrec(1) = 6; Xcr (1) = 0.1; Xvr (1) = 0.1;

Flow (1) = -1; Psp (1) = 0.4; PSta (1) = 1; Qsp (1) = 0.02; QSta (1) = 1;

Vcr (1) = 0.04; Tcr (1) = -87.13/57.3; VcrLo (1) = 0.001; VcrHi (1) = 0.2;

Vvr (1) = 1.0; Tvr (1) = 0.0; VvrLo (1) = 0.9; VvrHi (1) = 1.1;

VvrTar (1) = 1.0; VvrSta (1) = 1;

บทที่ 4

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

4.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 5 บัส

ศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งทั้งในส่วนของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) แบบธรรมดาที่ไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS และแบบที่ทำการต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบ ซึ่งอุปกรณ์ FACTS ที่ทำการต่อเข้าไปด้วยดังกล่าว ประกอบด้วย SVC TCSC และ UPFC ตามลำดับ โดยต่อเข้าไปในระบบ 5 บัส จากนั้นใช้อัลกอริทึมของนิวตันราฟสันเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

4.1.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดา

การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาซึ่งไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแต่ละเส้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Method) ผลการคำนวณเป็นดังรูปที่ 4.1

4.1.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่อ SVC เข้าไปในระบบ

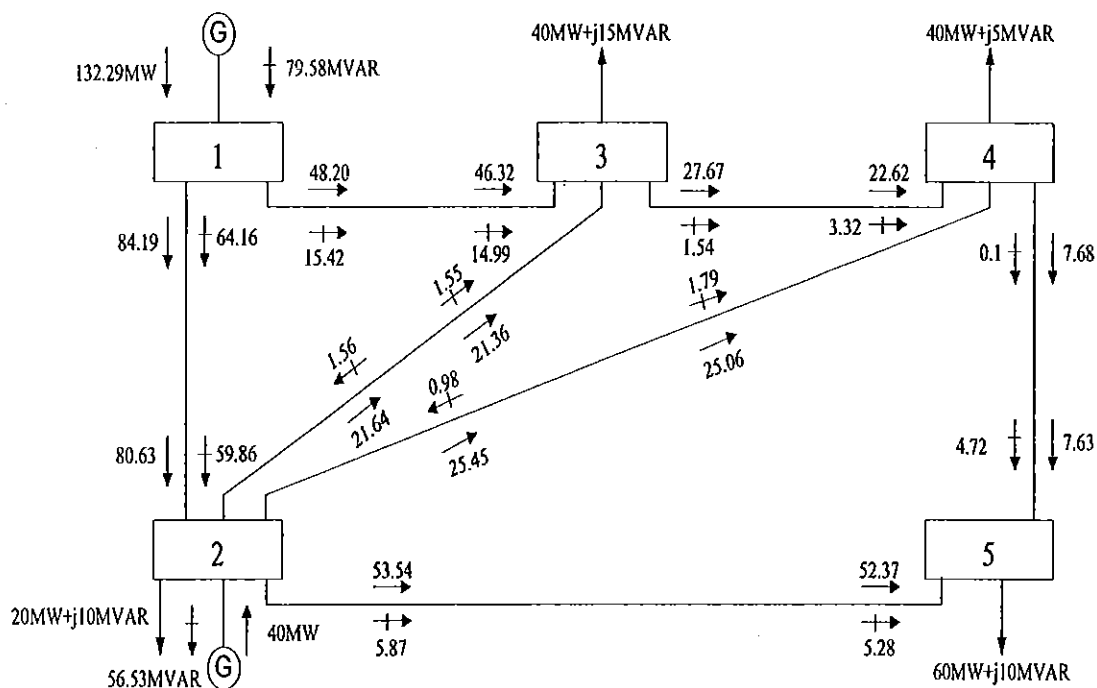
การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบที่บัส 3 ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแต่ละเส้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน ผลการคำนวณเป็นดังรูปที่ 4.2

4.1.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่อ TCSC เข้าไปในระบบ

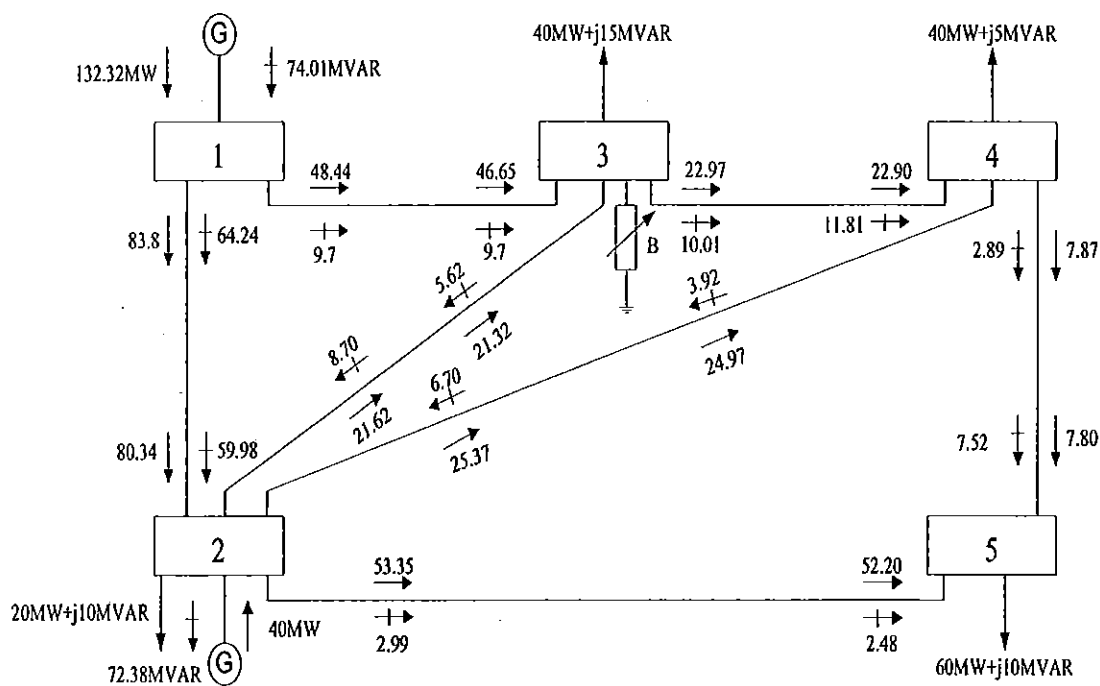
การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบระหว่างบัส 3 และบัส 4 ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแต่ละเส้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน ผลการคำนวณเป็นดังรูปที่ 4.3

4.1.4 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่อ UPFC เข้าไปในระบบ

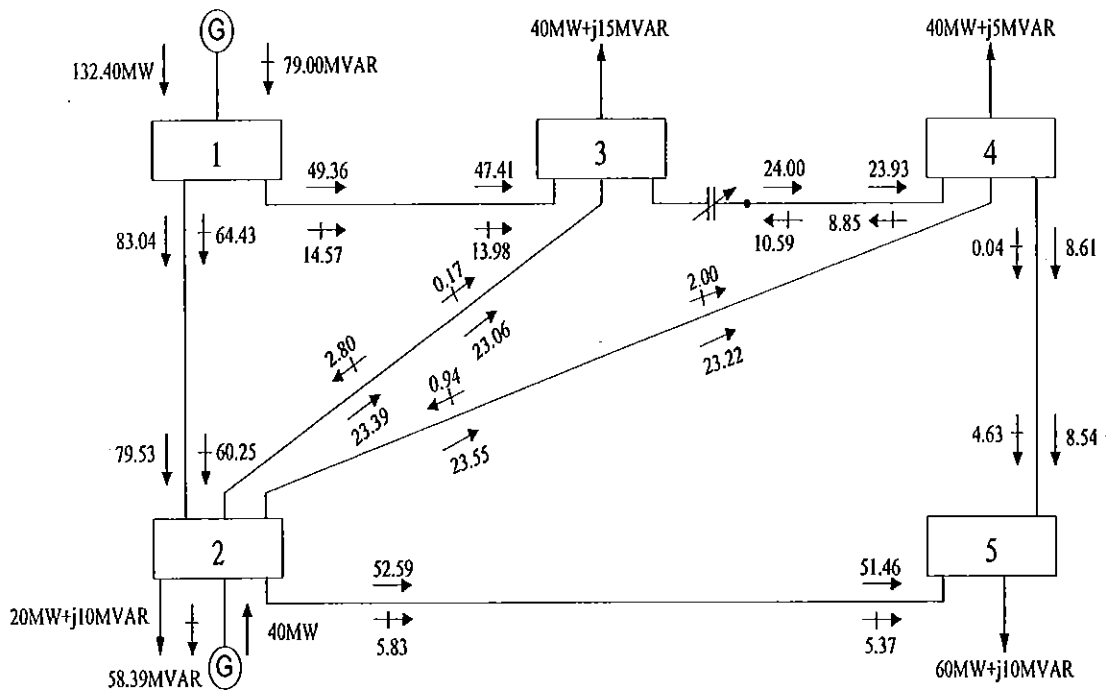
การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบระหว่างบัส 3 และบัส 4 ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแต่ละเส้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน ผลการคำนวณเป็นดังรูปที่ 4.4



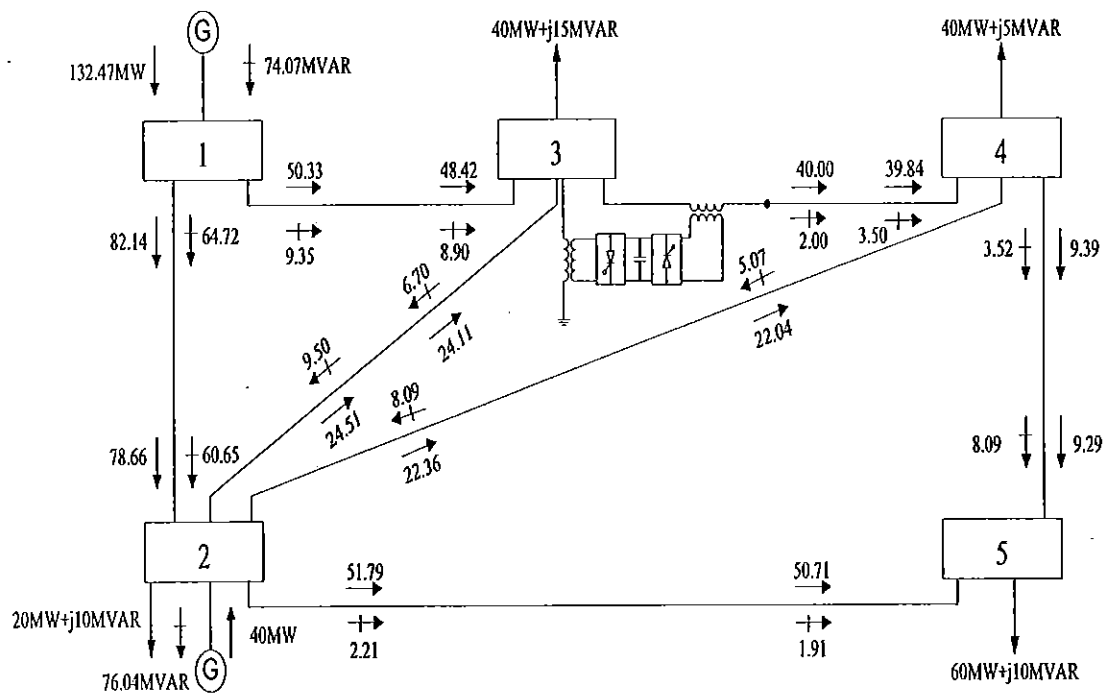
รูปที่ 4.1 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดา ซึ่งไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบ



รูปที่ 4.2 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบที่บัส 3



รูปที่ 4.3 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ
ระหว่างบัส 3 และบัส 4



รูปที่ 4.4 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ
ระหว่างบัส 3 และบัส 4

4.2 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อทำการต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

4.2.1. การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Sending End) ในสายส่ง 5 บัส

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Sending End) ในสายส่งเมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

สายส่ง (บัส-บัส)	การส่งจ่าย P,Q(MW,MVAR) เมื่อไม่มีการต่อ อุปกรณ์ FACTS	การส่งจ่าย P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ SVC	การส่งจ่าย P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ TCSC	การส่งจ่าย P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ UPFC
1-2	84.19, 64.16	83.88, 64.24	83.04, 64.43	82.14, 64.72
1-3	48.20, 15.42	48.44, 9.77	49.36, 14.57	50.33, 9.35
2-3	21.64, -1.56	21.62, -8.70	23.39, -2.80	24.51, -9.51
2-4	25.45, -0.98	25.37, -6.70	23.55, -0.94	22.36, - 8.09
2-5	53.54, 5.87	53.35, 2.99	52.59, 5.83	51.79, 2.21
3-4	22.67, 1.54	22.97, 10.01	24.00, -10.59	40.00, 2.00
4-5	7.68, 0.1	7.87, 2.89	8.61, 0.04	9.39, 3.52

ก. พิจารณาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Sending End) ในสายส่งระหว่างบัส 3 และ บัส 4

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ในสายส่ง มีค่าเป็น 22.67 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ในสายส่งมีค่าเป็น 1.54 MVAR

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 22.67 MW เพิ่มขึ้นเป็น 22.97 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.54 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น 10.01 MVAR

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 22.67 MW เพิ่มขึ้นเป็น 24.00 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.54 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น -10.59 MVAR

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 22.67 MW เพิ่มขึ้นเป็น 40.00 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.54 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น 2.00 MVAR

ข. พิจารณาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Sending End) ในสายส่งระหว่างบัส 4 และ บัส 5

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่ง มีค่าเป็น 7.68 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งมีค่าเป็น 0.1 MVAR

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 7.68 MW เพิ่มขึ้นเป็น 7.87 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.1 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น 2.89 MVAR

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 7.68 MW เพิ่มขึ้นเป็น 8.61 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.1 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น 0.04 MVAR

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 7.68 MW เพิ่มขึ้นเป็น 9.39 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.1 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น 3.52 MVAR

4.2.2 การรับกำลังไฟฟ้า (Receiving End) ในสายส่ง 5 บั๊ต

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบการรับกำลังไฟฟ้า (Receiving End) ในสายส่งเมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

สายส่ง (บั๊ต-บั๊ต)	การรับ P,Q(MW,MVAR) เมื่อไม่มีการต่อ อุปกรณ์ FACTS	การรับ P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ SVC	การรับ P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ TCSC	การรับ P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ UPFC
1-2	-80.63, -59.86	-80.34, -59.98	-79.53, -60.25	-78.66, -60.65
1-3	-46.31, -14.99	-46.65, -9.73	-47.41, -13.98	-48.42, -8.93
2-3	-21.36, -1.55	-21.32, 5.62	-23.06, -0.17	-24.11, 6.70
2-4	-25.06, -1.79	-24.97, 3.92	-23.22, -2.00	-22.04, 5.07
2-5	-52.37, -5.28	-52.20, -2.48	-51.46, -5.37	-50.71, -1.91
3-4	-22.62, -3.32	-22.90, -11.81	-23.93, 8.85	-39.84, -3.52
4-5	-7.63, -4.72	-7.80, -7.52	-8.54, -4.63	-9.29, -8.09

ก. พิจารณาการรับกำลังไฟฟ้า (Receiving End) ในสายส่งระหว่างบั๊ต 3 และ บั๊ต 4

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ในสายส่งมีค่าเป็น -22.62 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ในสายส่งมีค่าเป็น -3.32 MVAR

ข. เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับการรับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -22.62 MW เพิ่มขึ้นเป็น -22.90 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -3.32 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น -11.81 MVAR

ค. เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับการรับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -22.62 MW เพิ่มขึ้นเป็น -23.93 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -3.32 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น 8.85 MVAR

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบเทียบกับการรับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม -22.62 MW เพิ่มขึ้นเป็น -39.84 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -3.32 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น -3.52 MVAR

ข. พิจารณาการรับกำลังไฟฟ้า (Receiving End) ในสายส่งระหว่างบัส 4 และ บัส 5

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งมีค่าเป็น -7.63 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งมีค่าเป็น -4.72 MVAR

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับการรับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม -7.63 MW เพิ่มขึ้นเป็น -7.80 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -4.72 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น -7.52 MVAR

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับการรับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม -7.63 MW เพิ่มขึ้นเป็น -8.54 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งลดลงจากเดิม -4.72 MVAR ลดลงเป็น -4.63 MVAR

การรับกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับการรับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม -7.63 MW เพิ่มขึ้นเป็น -9.29 MW การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -4.72 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น -8.09 MVAR

4.2.3 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Power Line Loss) 5 บัต์

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Power Line Loss) เมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

สายส่ง (บัต์-บัต์)	การสูญเสีย P,Q(MW,MVAR) เมื่อไม่มีการต่อ อุปกรณ์ FACTS	การสูญเสีย P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ SVC	การสูญเสีย P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ TCSC	การสูญเสีย P,Q(MW,MVAR) เมื่อทำการต่อ อุปกรณ์ UPFC
1-2	3.56, 4.30	3.55, 4.27	3.51, 4.17	3.48, 4.07
1-3	1.89, 0.43	1.78, 0.04	1.95, 0.60	1.91, 0.42
2-3	0.28, -3.10	0.31, -3.08	0.33, -2.97	0.39, -2.82
2-4	0.39, -2.77	0.40, -2.78	0.33, -2.94	0.32, -3.03
2-5	1.17, 0.59	1.15, 0.51	1.13, 0.47	1.08, 0.30
3-4	0.05, -1.78	0.06, -1.79	0.07, -1.73	0.16, -1.52
4-5	0.05, -4.62	0.07, -4.63	0.07, -4.59	0.10, -4.58

ก. พิจารณาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Power Line Loss) ระหว่างบัต์ 3 และบัต์ 4

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ในสายส่งมีค่าเป็น 0.05 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ในสายส่งมีค่าเป็น -1.78 MVAR

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม 0.05 MW เพิ่มขึ้นเป็น 0.06 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -1.78 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น -1.79 MVAR

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม 0.05 MW เพิ่มขึ้นเป็น 0.07 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่งลดลง จากเดิม -1.78 MVAR ลดลงเป็น -1.73 MVAR

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม 0.05 MW เพิ่มขึ้นเป็น 0.16 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ในสายส่งลดลงจากเดิม -1.78 MVAR ลดลงเป็น -1.52 MVAR

ข. พิจารณาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Power Line Loss) ระหว่างบัส 4 และบัส 5

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งมีค่าเป็น 0.05 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่งมีค่าเป็น -4.62 MVAR

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม 0.05 MW เพิ่มขึ้นเป็น 0.07 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นจากเดิม -4.62 MVAR เพิ่มขึ้นเป็น -4.63 MVAR

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม 0.05 MW เพิ่มขึ้นเป็น 0.07 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่งลดลง จากเดิม -4.62 MVAR ลดลงเป็น -4.59 MVAR

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพิ่มขึ้น จากเดิม 0.05 MW เพิ่มขึ้นเป็น 0.10 MW การสูญเสียกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่งลดลง จากเดิม -4.62 MVAR ลดลงเป็น -4.58 MVAR

4.2.4 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 3-4 และระหว่างบัส 4-5

ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ	การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Sending End) ในสายส่ง P,Q(MW,MVAR)		การรับกำลังไฟฟ้า (Receiving End) ในสายส่ง P,Q(MW,MVAR)		การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Power Line Loss) P,Q(MW,MVAR)	
	บัส 3 -4	บัส 4 -5	บัส 3 -4	บัส 4 -5	บัส 3 -4	บัส 4 -5
แบบธรรมดา	22.67, 1.54	7.68, 0.1	-22.62, -3.32	-7.63, -4.72	0.05, -1.78	0.05, -4.62
SVC	22.97, 10.01	7.87, 2.89	-22.90, -11.81	-7.80, -7.52	0.06, -1.79	0.07, -4.63
TCSC	24.00, -10.59	8.61, 0.04	-23.93, -8.85	-8.54, -4.63	0.07, -1.73	0.07, -4.59
UPFC	40.00, 2.00	9.39, 3.52	-39.84, -3.52	-9.29, -8.09	0.16, -1.52	0.10, -4.58

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 3 – 4 และบัส 4 – 5

อุปกรณ์ SVC มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Sending End) การรับกำลังไฟฟ้า (Receiving End) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power Line Loss) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Power) มากที่สุด ณ บัส 3 – 4 และมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากที่สุด ณ บัส 4 – 5

อุปกรณ์ UPFC มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การรับกำลังไฟฟ้าและการสูญเสียกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงมากที่สุด ณ บัส 3 – 4 และมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การรับกำลังไฟฟ้า และการสูญเสียกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงมากที่สุด ณ บัส 4 – 5 อีกทั้งยังมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การรับกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากที่สุด ณ บัส 4 – 5

4.2.5 แรงดันไฟฟ้าที่บัส (Voltage Bus) ทั้ง 5 บัส

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่บัส (Voltage Bus) ต่างๆ เมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

สายส่ง (บัส-บัส)	แรงดันเมื่อไม่มีการ ต่ออุปกรณ์ FACTS $ V , \delta$ (p.u., p.u.)	แรงดันเมื่อทำการ ต่ออุปกรณ์ SVC $ V , \delta$ (p.u., p.u.)	แรงดันเมื่อทำการ ต่ออุปกรณ์ TCSC $ V , \delta$ (p.u., p.u.)	แรงดันเมื่อทำการ ต่ออุปกรณ์ UPFC $ V , \delta$ (p.u., p.u.)
1	1.0600, 0	1.0600, 0	1.0600, 0	1.0600, 0
2	1.0000, -3.2995	1.0000, -3.2886	1.0000, -3.2636	1.0000, -3.2269
3	0.9870, -5.5460	1.0000, -5.7495	0.9878, -5.7279	1.0000, -6.0140
4	0.9839, -5.9325	0.9944, -6.0831	0.9848, -5.6892	0.9985, -5.7469
5	0.9717, -6.9165	0.9753, -6.9462	0.9722, -6.8077	0.9767, -6.7880
6	-	-	0.9843, -5.2068	1.0033, -5.0778

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่บัส (Voltage Bus) ที่บัส 3 บัส 4 และบัส 5

ก. เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน มีค่าเป็น 0.9870 p.u. มุมเฟสของแรงดัน มีค่าเป็น -5.5460 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน มีค่าเป็น 0.9839 p.u. มุมเฟสของแรงดัน มีค่าเป็น -5.9325 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน มีค่าเป็น 0.9717 p.u. มุมเฟสของแรงดัน มีค่าเป็น -6.9165 p.u.

ข. เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9870 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 1.0000 p.u. มุมเฟสของแรงดัน ลดลง จากเดิม -5.5460 p.u. ลดลงเป็น -5.7495 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9839 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 0.9944 p.u. มุมเฟสของแรงดัน ลดลง จากเดิม -5.9325 p.u. ลดลงเป็น -6.0831 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9717 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 0.9753 p.u. มุมเฟสของแรงดัน ลดลง จากเดิม -6.9165 p.u. ลดลงเป็น -6.9462 p.u.

ก. เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มี การต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9870 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 0.9878 p.u. มุมเฟสของแรงดัน ลดลง จากเดิม -5.5460 p.u. ลดลงเป็น -5.7279 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มี การต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9839 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 0.9848 p.u. มุมเฟสของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม -5.9325 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น -5.6892 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มี การต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9717 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 0.9722 p.u. มุมเฟสของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม -6.9165 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น -6.8077 p.u.

ง. เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มี การต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9870 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 1.0000 p.u. มุมเฟสของแรงดัน ลดลง จากเดิม -5.5460 p.u. ลดลงเป็น -6.0140 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มี การต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9839 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 0.9985 p.u. มุมเฟสของแรงดัน ลดลง จากเดิม -5.9325 p.u. ลดลงเป็น -5.7469 p.u.

แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มี การต่ออุปกรณ์ FACTS พบว่า ขนาดของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม 0.9717 p.u. เพิ่มขึ้นเป็น 0.9767 p.u. มุมเฟสของแรงดัน เพิ่มขึ้น จากเดิม -6.9165 p.u. ลดลงเป็น -6.7880 p.u.

4.2.6 กำลังไฟฟ้าแต่ละบัส (Power Bus) ในสายส่ง 5 บัส

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่บัส (Power Bus) ต่างๆ เมื่อทำการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

สายส่ง (บัส- บัส)	กำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มี การต่ออุปกรณ์ FACTS P,Q(MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าเมื่อทำ การต่ออุปกรณ์ SVC P,Q(MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าเมื่อทำ การต่ออุปกรณ์ TCSC P,Q(MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าเมื่อทำ การต่ออุปกรณ์ UPFC P,Q(MW,MVAR)
1	132.39, 79.58	132.32, 74.01	132.40, 79.26	132.47, 74.06
2	-20.00, -56.53	-20.00, -72.38	-20.00, -58.39	-20.00, -76.04
3	-45.00, -15.00	-45.00, 5.90	-45.00, -14.90	-45.00, 3.90
4	-40.00, -5.00	-40.00, -5.00	-40.00, -5.00	-40.00, -5.00
5	-60.00, -10.00	-60.00, -10.00	-60.00, -10.00	-60.00, -10.00

4.2.7 พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมทั้งระบบ

ตารางที่ 4.7 แสดงพิกัดกำลังไฟฟ้ารวมทั้งระบบ

พิกัด	กำลังไฟฟ้าเมื่อไม่ มีการต่ออุปกรณ์ FACTS P,Q(MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าเมื่อทำ การต่ออุปกรณ์ SVC P,Q(MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าเมื่อทำ การต่ออุปกรณ์ TCSC P,Q(MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าเมื่อทำ การต่ออุปกรณ์ UPFC P,Q(MW,MVAR)
เครื่อง กำเนิด ไฟฟ้า	172.39, 33.05	172.32, 11.63	172.40, 30.61	172.47, 8.03
ภาระ ไฟฟ้า	-165.00, -40.00	-165.00, -40.00	-165.00, -40.00	-165.00, -40.00
กำลังไฟฟ้า สูญเสีย	7.39, -6.95	7.32, -28.37	7.40, -9.39	7.47, -31.97

ค่าร้อยละกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Line Loss)

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ

$$\frac{7.39-7.32}{7.39} \times 100 = 0.9472\%$$

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ

$$\frac{7.39-7.40}{7.39} \times 100 = -0.1353\%$$

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ

$$\frac{7.39-7.47}{7.39} \times 100 = -1.0825\%$$

พิจารณาค่าร้อยละกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Line Loss)

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบ ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง โดยแต่ละอุปกรณ์ที่ทำการต่อเข้าไปในนั้นทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียแตกต่างกัน เมื่อคำนวณออกมาเป็นค่าร้อยละกำลังไฟฟ้าสูญเสีย พบว่า เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC มีค่าเป็น -1.0825 % ซึ่งมากที่สุด เนื่องจากการเพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้ามากที่สุด ทำให้มีกระแสไหลในสายส่งปริมาณมาก ดังนั้นจึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากที่สุด ส่งผลให้ค่าร้อยละกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากตามไปด้วย รองลงมาคือเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC ซึ่งมีค่าเป็น 0.9472 % เนื่องจากการเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้ารองจากอุปกรณ์ UPFC ทำให้มีกระแสไหลในสายส่งปริมาณมาก ดังนั้นจึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ส่งผลทำให้ค่าร้อยละกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าน้อยรองจากอุปกรณ์ UPFC และเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC ซึ่งมีค่า -0.1353 % เนื่องจากการเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด ทำให้มีกระแสไหลในสายส่งเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย ส่งผลให้ค่าร้อยละกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีน้อยที่สุด

4.3 ตารางเปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อทำการต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

4.3.1 การปรับเปลี่ยนค่าชั้สเซปแดนซ์ขนาน

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าชั้สเซปแดนซ์ขนาน เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปที่บัส 3

ชั้สเซปแดนซ์ ขนานเริ่มต้น ($B_{เริ่มต้น}$)	ชั้สเซปแดนซ์ ขนานสุดท้าย ($B_{สุดท้าย}$)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 4-5 P,Q (MW,MVAR)
0.01	0.05	22.97, 10.01	7.87, - 2.89
0.02	0.05	22.97, 10.01	7.87, - 2.89
0.04	0.05	22.97, 10.01	7.87, - 2.89
0.06	0.05	22.97, 10.01	7.87, - 2.89
0.08	0.05	22.97, 10.01	7.87, - 2.89
0.10	0.05	22.97, 10.01	7.87, - 2.89

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3- 4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าชั้สเซปแดนซ์ขนานเริ่มต้น ($B_{เริ่มต้น}$) เมื่อทำการเพิ่มค่าค่าจาก 0.01- 0.10 ค่าชั้สเซปแดนซ์ขนานสุดท้าย ($B_{สุดท้าย}$) ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า 0.05 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 22.97 MW และ 10.01 MVAR ตามตารางที่ 4.8

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4- 5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าชั้สเซปแดนซ์ขนานเริ่มต้น เมื่อทำการเพิ่มค่าค่าจาก 0.01 – 0.10 ค่าชั้สเซปแดนซ์ขนานสุดท้ายที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า 0.05 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 7.87 MW และ -2.89 MVAR ตามตารางที่ 4.8

เนื่องจาก อุปกรณ์ SVC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าชั้สเซปแดนซ์ขนานค่าใดก็ตาม ค่าชั้สเซปแดนซ์ขนานที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติ ซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่าชั้สเซปแดนซ์ขนานที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า 0.05 ตามตารางที่ 4.8

4.3.2 การปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไประหว่างบัส 3-4

รีแอกแตนซ์ อนุกรมเริ่มต้น ($X_{\text{เริ่มต้น}}$)	รีแอกแตนซ์ อนุกรมสุดท้าย ($X_{\text{สุดท้าย}}$)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 4-5 P,Q (MW,MVAR)
-0.0025	-0.0481	24, -10.59	8.61, 0.04
-0.005	-0.0481	24, -10.59	8.61, 0.04
-0.0075	-0.0481	24, -10.59	8.61, 0.04
-0.0100	-0.0481	24, -10.59	8.61, 0.04
-0.0125	-0.0481	24, -10.59	8.61, 0.04
-0.0150	-0.0481	24, -10.59	8.61, 0.04
-0.0155	-0.0481	24, -10.59	8.61, 0.04

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (P_{sp}) = 0.24

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3-4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมเริ่มต้น ($X_{\text{เริ่มต้น}}$) เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก (-0.0025) – (-0.0155) ค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมสุดท้าย ($X_{\text{สุดท้าย}}$) ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า -0.0481 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 24 MW และ -10.59 MVAR ตามตารางที่ 4.9

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4-5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมเริ่มต้น เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก (-0.0025) – (-0.0155) ค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมสุดท้าย ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า -0.0481 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 8.61 MW แล 0.04 MVAR ตามตารางที่ 4.9

เนื่องจาก อุปกรณ์ TCSC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมค่าใดก็ตาม ค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า -0.0481 ตามตารางที่ 4.9 เพื่อรักษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงตามที่ทำการตั้งไว้

4.3.3 การปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (Target Active Power)

ตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้
เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไประหว่างบัส 3- 4

กำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (Psp)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 4-5 P,Q (MW,MVAR)
0.18	18.00, -2.79	8.38, 0.34
0.20	20.00, -4.55	8.46, 0.28
0.22	22.00, -6.94	8.53, 0.18
0.24	24.00, -10.59	8.01, 0.41
0.26	25.99, -34.37	8.67, -0.89
0.28	28.00, -27.80	8.74, -0.62

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม (x) = -0.015

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3- 4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (Psp) เมื่อทำการเพิ่มค่าขึ้นจาก 0.18 -0.28 p.u. พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้นจาก 18-28 MW ตามตารางที่ 4.10

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4- 5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ เมื่อทำการเพิ่มค่าขึ้นจาก 0.18 – 0.28 p.u. พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง เพิ่มขึ้นจาก 8.38 - 8.74 MW ตามตารางที่ 4.10

เนื่องจาก อุปกรณ์ TCSC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้เสมอตามตารางที่ 4.10

4.3.4 การปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3- 4

แรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมเริ่มต้น ($V_{cr_{เริ่มต้น}}$)	แรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมสุดท้าย ($V_{cr_{สุดท้าย}}$)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 4-5 P,Q (MW,MVAR)
0.01	0.09713	40, 2	9.39, 3.52
0.02	0.09713	40, 2	9.39, 3.52
0.03	0.09713	40, 2	9.39, 3.52
0.04	0.09713	40, 2	9.39, 3.52
0.05	0.09713	40, 2	9.39, 3.52
0.06	0.09713	40, 2	9.39, 3.52
0.07	0.09713	40, 2	9.39, 3.52

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (P_{sp}) = 0.4

ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Q_{sp}) = 0.02

ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (T_{cr}) = $-87.13/57.3$

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ขนาน (V_{vr}) = 1.0

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ขนาน (T_{vr}) = 0

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3- 4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมเริ่มต้น ($V_{cr_{เริ่มต้น}}$) เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก 0.01 – 0.07 ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมสุดท้าย ($V_{cr_{สุดท้าย}}$) ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า 0.0973 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 40 MW และ 2 MVAR ตามตารางที่ 4.11

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4- 5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมเริ่มต้น เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก 0.01 - 0.07 ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมสุดท้าย ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า 0.09713 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 9.39 MW แล 3.52 MVAR ตามตารางที่ 4.11

เนื่องจาก อุปกรณ์ UPFC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมค่าใดก็ตาม ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า 0.09713 ตามตารางที่ 4.11

4.3.5 การปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม

ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3-4

มุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมเริ่มต้น (T_{cr} เริ่มต้น)	มุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมสุดท้าย (T_{cr} สุดท้าย)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 4-5 P,Q (MW,MVAR)
-67.13/ 57.3	-100.6288	40, 2	9.39, 3.52
-77.13/ 57.3	-100.6288	40, 2	9.39, 3.52
-87.13/ 57.3	-100.6288	40, 2	9.39, 3.52
-97.13/ 57.3	-100.6288	40, 2	9.39, 3.52
-107.13/ 57.3	-100.6288	40, 2	9.39, 3.52
-117.13/ 57.3	-100.6288	40, 2	9.39, 3.52
-127.13/ 57.3	-100.6288	40, 2	9.39, 3.52

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (P_{sp}) = 0.4

ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Q_{sp}) = 0.02

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (V_{cr}) = 0.04

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (V_{vr}) = 1.0

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (T_{vr}) = 0

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3-4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (T_{cr} เริ่มต้น) เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก (-67.13/ 57.3) – (-127.13/ 57.3) ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมสุดท้าย (T_{cr} สุดท้าย) ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า -100.6288 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 40 MW และ 2 MVAR ตามตารางที่ 4.12

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4-5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมเริ่มต้น เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก $(-67.13/57.3) - (-127.13/57.3)$ ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมสุดท้าย ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า -100.6288 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 9.39 MW และ 3.52 MVAR ตามตารางที่ 4.12

เนื่องจาก อุปกรณ์ UPFC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมค่าใดก็ตาม ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า -100.6288 ตามตารางที่ 4.12

4.3.6 การปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ขนาน

ตารางที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ขนาน เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3-4

แรงดันคอนเวอร์เตอร์ขนานเริ่มต้น (V_{vr} เริ่มต้น)	แรงดันคอนเวอร์เตอร์ขนานสุดท้าย (V_{vr} สุดท้าย)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 4-5 P,Q (MW,MVAR)
0.6	0.0565	40, 2	9.39, 3.52
0.8	0.0565	40, 2	9.39, 3.52
1.0	0.0565	40, 2	9.39, 3.52
1.2	0.0565	40, 2	9.39, 3.52
1.4	0.0565	40, 2	9.39, 3.52
1.6	0.0565	40, 2	9.39, 3.52
1.8	0.0565	40, 2	9.39, 3.52

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (P_{sp}) = 0.4

ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Q_{sp}) = 0.02

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (V_{cr}) = 0.04

ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (T_{cr}) = $-87.13/57.3$

ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนาน (T_{vr}) = 0

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3- 4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชานเริ่มต้น (V_{vr} เริ่มต้น) เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก 0.6 – 1.8 ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชานสุดท้าย (V_{vr} สุดท้าย) ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า 0.0565 ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 40 MW และ 2 MVAR ตามตารางที่ 4.13

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4- 5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชานเริ่มต้น เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก 0.6 -1.8 ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชานสุดท้าย ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า 0.0565 ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 9.39 MW แล 3.52 MVAR ตามตารางที่ 4.13

เนื่องจาก อุปกรณ์ UPFC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชานค่าใดก็ตาม ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชานที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชานที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า 0.0565 ตามตารางที่ 4.13

4.3.7 การปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนาน

ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนาน เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3- 4

มุมคอนเวอร์เตอร์ ขนานเริ่มต้น (T_{vr} เริ่มต้น)	มุมคอนเวอร์เตอร์ ขนานสุดท้าย (T_{vr} สุดท้าย)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 4-5 P,Q (MW,MVAR)
-0.1	-6.0202	40, 2	9.39, 3.52
0	-6.0202	40, 2	9.39, 3.52
0.1	-6.0202	40, 2	9.39, 3.52
0.3	-6.0202	40, 2	9.39, 3.52
0.5	-6.0202	40, 2	9.39, 3.52
0.7	-6.0202	40, 2	9.39, 3.52
0.9	-6.0202	40, 2	9.39, 3.52

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (P_{sp}) = 0.4

ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Q_{sp}) = 0.02

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (V_{cr}) = 0.04

ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (T_{cr}) = $-87.13/57.3$

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (V_{vr}) = 1.0

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3- 4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนานเริ่มต้น (T_{vr} เริ่มต้น) เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก (-0.1) – (0.9) ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนานสุดท้าย (T_{vr} สุดท้าย) ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า -6.0202 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 40 MW และ 2 MVAR ตามตารางที่ 4.14

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4- 5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนานเริ่มต้น เมื่อทำการเพิ่มค่าจาก (-0.1)- (0.9) ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนานสุดท้าย ที่นำไปใช้จริงในระบบเป็นค่าเดิมเสมอ นั่นคือค่า -6.0202 ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า โดยมีค่า 9.39 MW และ 3.52 MVAR ตามตารางที่ 4.14

เนื่องจาก อุปกรณ์ UPFC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ และรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนานค่าใดก็ตาม ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนานที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่ามุมคอนเวอร์เตอร์ขนานที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า -6.0202 ตามตารางที่ 4.14

4.3.8 การปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (Target Active Power)

ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3-4

กำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (Psp)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)
0.1	10, 2	8.27,3.25
0.3	30, 2	9.39,3.523
0.4	40, 2	9.02, 3.43
0.5	50, 2	9.75, 3.60
0.7	70, 2	10.46, 3.75
0.9	90, 2	11.5, 3.89
1.1	110, 2	11.81, 4.01

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Qsp) = 0.02

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Vcr) = 0.04

ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Tcr) = $-87.13/57.3$

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Vvr) = 1.0

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Tvr) = 0

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3-4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (Psp) เมื่อทำการเพิ่มค่าขึ้นจาก 0.1 -1.1 p.u. พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้นจาก 10 – 110 MW ตามตารางที่ 4.15

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4-5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ เมื่อทำการเพิ่มค่าขึ้นจาก 0.1 -1.1 p.u. พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้นจาก 8.27 – 11.81 MVAR ตามตารางที่ 4.15

เนื่องจาก อุปกรณ์ UPFC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้เสมอ ตามตารางที่ 4.15

4.3.9 การปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Target Reactive Power)

ตารางที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไประหว่างบัส 3-4

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Qsp)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)	กำลังไฟฟ้าสายส่ง 3-4 P,Q (MW,MVAR)
0.01	40, 1	9.39, 3.45
0.02	40, 2	9.39, 3.52
0.03	40, 3	9.39, 3.58
0.04	40, 4	9.39, 3.65
0.05	40, 5	9.39, 3.71
0.06	40, 6	9.39, 3.78
0.07	40, 7	9.39, 3.85

หมายเหตุ : กำหนดให้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (Psp) = 0.4

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Vcr) = 0.04

ค่ามุมคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Tcr) = -87.13/ 57.3

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Vvr) = 1.0

ค่าแรงดันคอนเวอร์เตอร์อนุกรม (Tvr) = 0

ก. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3-4

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Qsp) เมื่อทำการเพิ่มจาก 0.01 -0.07 p.u. พบว่าค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มขึ้นจาก 1 – 7 MVAR ตามตารางที่ 4.16

ข. พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 4-5

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ เมื่อทำการเพิ่มจาก 0.01-0.07 p.u. พบว่าค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มขึ้นจาก 3.45 – 3.85 MVAR ตามตารางที่ 4.16

เนื่องจาก อุปกรณ์ UPFC มีหน้าที่เพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้เสมอ ตามตารางที่ 4.16

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุป

จากการวิเคราะห์ การไหลกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาจากบัส 3 ไปบัส 4 สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Sending End) พบว่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) มีค่า 22.67 MW และ 1.54 MVAR ตามลำดับ

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ กระแสรีแอกทีฟถูกฉีดไปยังสายส่งเพื่อรักษาขนาดของแรงดันบัสที่ทำการเชื่อมต่อให้คงที่ นั่นคือให้มีค่า 1.00 p.u. และมีการเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในปริมาณที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงได้อีกเล็กน้อย โดยมีค่า 10.01 MVAR และ 22.97 MW ตามลำดับ

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (Z) เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ลดลง ดังนั้น จะเป็นการเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงต้องทำการจัดให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในปริมาณที่มากกว่า TCSC โดยมีค่า 24.00 MW และ -10.59 MVAR ตามลำดับ

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ ณ คอนเวอเตอร์ขานาน กระแสรีแอกทีฟถูกฉีดไปยังสายส่งเพื่อรักษาขนาดของแรงดันบัสที่ทำการเชื่อมต่อให้คงที่ นั่นคือให้มีค่า 1.00 p.u. และมีการเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ณ คอนเวอเตอร์อนุกรม การเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงปริมาณมาก เกิดจากคอนเวอเตอร์ขานานดึงกำลังไฟฟ้าจริงจากโครงข่ายกระแสสลับและจ่ายให้คอนเวอเตอร์อนุกรมผ่านการเชื่อมโยงกระแสตรง (ตัวเก็บประจุ) โดยมีค่า 2.00 MVAR และ 40.00 MW ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดในสายส่งแบบธรรมดา พบว่า มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งมีค่า 7.39 MW และ -6.95 MVAR ตามลำดับ

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ เนื่องจากมีการเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้า ทำให้มีกระแสไหลในสายส่งปริมาณมาก ดังนั้นจึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งมีค่า 7.32 MW และ -28.37 MVAR ตามลำดับ

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ เนื่องจากมีการเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ทำให้มีกระแสไหลในสายส่งน้อย ดังนั้นจึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อย ซึ่งมีค่า 7.40 MW และ -9.39 MVAR ตามลำดับ

เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบ เนื่องจากมีการเพิ่มการไหลกำลังไฟฟ้าในปริมาณมาก ทำให้มีกระแสไหลในสายส่งมาก ดังนั้นจึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมาก ซึ่งมีค่า 7.47 MW และ -31.97 MVAR ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ การปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อทำการเพิ่มการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ พบว่า

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ SVC เข้าไปในระบบ การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขึ้นอยู่กับค่าชั้สเซปแทนซ์ขนาน (B_{SVC}) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าชั้สเซปแทนซ์ขนานค่าใดก็ตาม ค่าชั้สเซปแทนซ์ขนานที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติ ซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่าชั้สเซปแทนซ์ขนานที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า 0.05 ตามตารางที่ 4.8 และยังสามารถรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่เท่ากับ 1.00 p.u. จากการปรับค่าชั้สเซปแทนซ์ขนาน

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบ การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงขึ้นอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม (x) และค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ สำหรับค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมค่าใดก็ตาม ค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า -0.0481 ตามตารางที่ 4.9 เพื่อรักษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงตามที่ทำการตั้งไว้ สำหรับค่าการไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้เสมอ ตามตารางที่ 4.10

เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขึ้นอยู่กับค่า แรงดันคอนเวเตอร์อนุกรม (V_{cr}) มุมคอนเวเตอร์อนุกรม (T_{cr}) แรงดันคอนเวเตอร์ขนาน (V_{vr}) มุมคอนเวเตอร์ขนาน (T_{vr}) กำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้ (P_{sp}) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ (Q_{sp}) สำหรับค่า แรงดันคอนเวเตอร์อนุกรม (V_{cr}) มุมคอนเวเตอร์อนุกรม (T_{cr}) แรงดันคอนเวเตอร์ขนาน (V_{vr}) มุมคอนเวเตอร์ขนาน (T_{vr}) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเป็นค่าใดก็ตาม ค่าที่นำไปใช้จริงในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าได้ ซึ่งค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือค่า 0.09713 ตามตารางที่ 4.11 -100.6288 ตามตารางที่ 4.12 0.0565 ตามตารางที่ 4.13 -6.0202 ตามตารางที่ 4.14 ตามลำดับ สำหรับค่า การไหลกำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้และการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าทั้งสองดังกล่าว ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตั้งไว้และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตั้งไว้เสมอ ตามตารางที่ 4.15 และตามตารางที่ 4.16 ตามลำดับ และยังสามารถรักษาระดับแรงดันบัสให้คงที่เท่ากับ 1.00 p.u. จากการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดดังกล่าว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิทีฟและรีแอกแตนซ์ของอินดักทีฟของอุปกรณ์ FACTS ควรจะเลือกด้วยความระมัดระวัง เพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าจะมีจุดเรโซแนนซ์ (resonant) เพียง 1 จุด ภายในพิสัย $\frac{\pi}{2}$ ถึง π

5.2.2 ในการนำอุปกรณ์ FACTS มาใช้ในระบบ 3 เฟส การเชื่อมต่อควรให้เกิดความสมดุล เพื่อที่จะไม่เกิดการดีคัปเปิ้ล (decouple) ทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้า

5.2.3 อุปกรณ์ FACTS ที่นำมาใช้ต่อเข้ากับระบบในโครงการนี้ มีเพียง 3 อุปกรณ์เท่านั้น ซึ่งยังคงมีอุปกรณ์ FACTS อื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ได้

5.2.4 ระบบที่ทำการศึกษากลับเป็นเพียงระบบ 5 บัส ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอื่นๆที่มีจำนวนบัสเพิ่มมากขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชลิต คำรงรัตน์. การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเล่ม 1. กรุงเทพมหานคร : เอช.เอ็น.กรุ๊ป. 2538.
- [2] มงคล ทองสงคราม. การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : รามาการพิมพ์. 2535.
- [3] สุรัตน์ นันตะสุนทร. ระบบไฟฟ้ากำลังเล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2537.
- [4] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez and Cesar Angeles-Camacho, **FACTS Modelling and Simulation in Power Networks**, Wiley, 2004.
- [5] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara and T.J.E. Miller, **Power Electronic Control in Electrical System**, Newnes, 2002.
- [6] Hadi Saadat, **POWER SYSTEM ANALYSIS**, McGraw-Hill, 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก
ตารางข้อมูลบัส 5 บัส

ตารางที่ 1 ข้อมูลบัส 5 บัส

บัส	ขนาดแรงดัน และมุมเฟส แรงดัน (V, δ)	ภาระไฟฟ้า (MW, MVAR)	เจนเนอเรเตอร์		การฉีด (inject) กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ (MVAR)
			(MW, MVAR)	(Q_{min}, Q_{max})	
1	1.06, 0	0, 0	0, 0	5, -5	0
2	1.00, 0	0.2, 0.1	0.4, 0	3, -3	0
3	1.00, 0	0.45, 0.15	0, 0	0, 0	0
4	1.00, 0	0.4, 0.05	0, 0	0, 0	0
5	1.00, 0	0.6, 0.1	0, 0	0, 0	0

ตารางที่ 2 ข้อมูลสายส่ง 5 บัส

บัสส่ง	บัสรับ	ความต้านทานของสาย ส่ง	รีแอกแตนซ์ของสาย ส่ง	ซีสเซปแดนซ์ของสาย ส่ง
1	2	0.02	0.06	0.06
1	3	0.08	0.24	0.05
2	3	0.06	0.18	0.04
2	4	0.06	0.18	0.04
2	5	0.04	0.12	0.03
3	4	0.010	0.03	0.02
4	5	0.08	0.24	0.05

ประวัติผู้เขียนโครงการ



ชื่อ นายสุชน รัญญะเจริญ

ภูมิลำเนา 363/1 ถ.เพชรเจริญ ต.ในเมือง อ.เมือง

จ.เพชรบูรณ์ 67000

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเพชรพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : nay_suthon@hotmail.com



ชื่อ นายเฉลิมพล สุขศิริ

ภูมิลำเนา 75 ม.10 ต.วังไทร อ.คลองขลุง

จ.กำแพงเพชร 62120

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวังตะเคียนประชานุสรณ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : kanom12@hotmail.com



ชื่อ นายศราวุธ โพชะกะ

ภูมิลำเนา 120 ม.6 ต.สวนหม่อน อ.มัญจาคีรี

จ.ขอนแก่น 40160

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมัญจาคีรี
- ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : ee_hongta@hotmail.com